



**НАУКОВО-ТЕХНІЧНІ ПІДХОДИ  
ДО ВИРІШЕННЯ АКТУАЛЬНИХ ПРОБЛЕМ  
РОЗБУДОВИ СЕКТОРУ БЕЗПЕКИ І ОБОРОНИ**

Колективна монографія

Харків  
Друкарня МАДРИД  
2021

УДК 351.746.1(477)

НЗ4

*Рекомендовано Вченою радою Національного технічного університету  
«Харківський політехнічний інститут» до друку протокол № 9 від 24.09.21 р.*

**КОЛЕКТИВ АВТОРІВ:**

*Чепков І. Б., Бісик С. П., Миронюк О. Ю., Сливінський О. А.,  
Давидовський Л. С., Мионов Я. А., Марченко А. П., Кравченко С. С., Лісачук Г. В.,  
Зінченко С. В., Пітак Я. М., Кривобок Р. В., Захаров А. В., Чефранов Є. В.,  
Волощук В. В., Майстат М. С., Буряковський С. Г., Волонцевич Д. О.,  
Любарський Б. Г., Тищенко А. А., Князєв В. В., Каракуркчі Г. В., Сахненко М. Д.,  
Майба М. В., Горохівський А. С., Карножицький П. В., Мірошиниченко Д. В.,  
Руднєва К. Є., Руднєв В. А., Сініцина А. О., Шевченко С. Ю., Данильченко Д. О.,  
Дривецький С. І., Ткачук М. А., Кравченко С. О., Ткачук М. М., Грабовський А. В.,  
Веретельник О. В.*

**РЕЦЕНЗЕНТИ:**

**Білоусов Є.В.**, доктор технічних наук, доцент кафедри «Експлуатація суднових енергетичних установок» Херсонської Державної морської академії;

**Каграманян А.О.**, проректор з науково-педагогічної роботи, кандидат технічних наук, доцент кафедри «Теплотехніка, теплові двигуни та енергетичний менеджмент» Українського державного університету залізничного транспорту

**НЗ4** **Науково-технічні підходи до вирішення актуальних проблем  
розбудови сектору безпеки і оборони під загальною редакцією проф.  
Марченка А. П.:** колективна монографія. Харків : Друкарня МАДРИД,  
2021. 326 с.

ISBN 978-617-7988-69-3

Розглянуто актуальні проблеми створення сучасного озброєння та військової техніки, а також наведено інформацію про актуальні проблеми протимінного та балістичного захисту бойових броньованих машин. Наведено дані щодо перспективних електротехнічних систем, що додають динамічності та надійності легкоброньованій техніці. Проаналізовано чинники впливу діяльності людини у військовій сфері на екологію та представлено шляхи покращення екологічної безпеки країни за рахунок сучасних розробок. Представлено результати досліджень, спрямованих на вивчення і розробку імітаторів магнітного поля блискавки та забезпечення електропостачанням військових об'єктів.

Колективну монографію призначено для ознайомлення широкого кола науковців та фахівців, що працюють в секторі безпеки і оборони, з результатами власних досліджень авторського колективу.

**УДК 351.746.1(477)**

© НТУ «ХП», 2021

ISBN 978-617-7988-69-3

© ТОВ «Друкарня МАДРИД», 2021

## З М І С Т

АКТУАЛЬНІ ПРОБЛЕМИ ПРОТИМІННОГО ТА БАЛІСТИЧНОГО ЗАХИСТУ БОЙОВИХ БРОНЬОВАНИХ МАШИН Чепков І. Б., Бісик С. П., Миронюк О. Ю., Сливінський О. А., Давидовський Л. С., Миронов Я. А. ....	5
ПОКРАЩЕННЯ ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ КРАЇНИ ЗА РАХУНОК ВИКОРИСТАННЯ НИЗЬКОКАЛОРИЙНИХ ГАЗОВИХ ПАЛИВ У ДВИГУНАХ ВНУТРІШНЬОГО ЗГОРЯННЯ Марченко А. П., Кравченко С. С. ....	58
ДО ПИТАННЯ ПРО СТВОРЕННЯ РАДІОПРОЗОРИХ КЕРАМІЧНИХ МАТЕРІАЛІВ НА ОСНОВІ СИСТЕМИ $RO - Al_2O_3 - SiO_2$ Лісачук Г. В., Зінченко С. В., Пітак Я. М., Кривобок Р. В., Захаров А. В., Чефранов Є. В., Волощук В. В., Майстат М. С. ....	91
ПЕРСПЕКТИВНІ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНІ СИСТЕМИ ДЛЯ ЛЕГКОБРОНЬОВАНОЇ ТЕХНІКИ Буряковський С. Г., Волонцевич Д. О., Любарський Б. Г., Тищенко А. А. ....	127
ФІЗИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ МАГНІТНОГО ПОЛЯ БЛИСКАВКИ Князев В. В. ....	166
ФУНКЦІОНАЛЬНІ ПОКРИТТЯ В ІНЖЕНЕРІЇ ПОВЕРХНІ ДЕТАЛЕЙ СИЛОВИХ УСТАНОВОК АВТОМОБІЛЬНОЇ ТА БРОНЕТАНКОВОЇ ТЕХНІКИ Каракуркчі Г. В., Сахненко М. Д., Майба М. В., Горохівський А. С. ....	208
ШЛЯХИ ВИРІШЕННЯ ДЕЯКИХ ЕКОЛОГІЧНИХ ПРОБЛЕМ, ВИКЛИКАНИХ ДІЯЛЬНІСТЮ ЛЮДИНИ У ВІЙСЬКОВІЙ СФЕРІ Карножицький П. В., Мірошніченко Д. В., Руднева К. Є., Руднев В. А., Сінціна А. О. ....	235

ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ НАДІЙНОГО ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ  
ВІЙСЬКОВИХ ОБ'ЄКТІВ

Шевченко С. Ю., Данильченко Д. О., Дривецький С. І.....262

ДИСКРЕТНО-КОНТИНУАЛЬНІ МЕТОДИ ЗМІЦНЕННЯ ЕЛЕМЕНТІВ  
МАШИН ВІЙСЬКОВОГО ТА ЦИВІЛЬНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ

Ткачук М. А., Кравченко С. О., Ткачук М. М.,

Грабовський А. В., Веретельник О. В. ....290

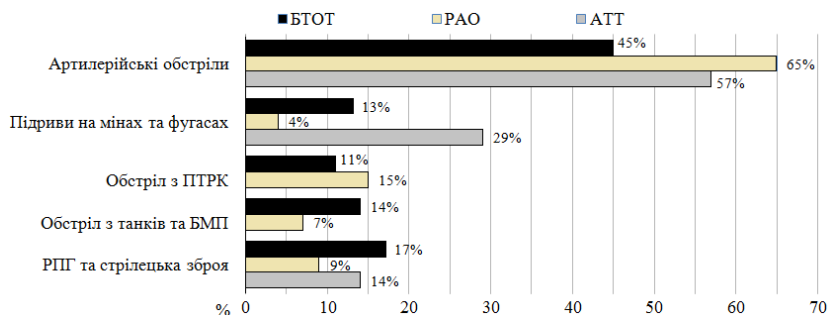
# АКТУАЛЬНІ ПРОБЛЕМИ ПРОТИМІННОГО ТА БАЛІСТИЧНОГО ЗАХИСТУ БОЙОВИХ БРОНЬОВАНИХ МАШИН

*Чепков І. Б., Бісик С. П., Миронюк О. Ю., Сливінський О. А.,  
Давидовський Л. С., Миронов Я. А.*

## Вступ

### Актуальні дослідження

Проведення Антитерористичної операції на території Донецької та Луганської областей (АТО) та Операції об'єднаних Сил (ООС) відкрило невідповідність існуючого рівня захисту бойових броньованих машин (БМ) сучасних загрозам. Це спричинило втрати БМ та особового складу внаслідок бойових пошкоджень різною номенклатурою засобів ураження. За даними роботи [1] основна частина БМ знищена внаслідок масованих артилерійських обстрілів, що велись, в тому числі, й з території Російської Федерації (рис. 1).



*Рисунок 1. Розподіл пошкоджених зразків ОВТ ЗС України в ході проведення АТО у відповідності до застосованих по ним засобів ураження*

Забезпечення захищеності БМ було і залишається актуальним за умови постійного вдосконалення засобів їх ураження, але навіть сучасні технології не дозволяють створювати зразки здатні протистояти прямому попаданню артилерійського снаряду. В даному випадку, результати аналізу бойових пошкоджень БМ в ході проведення АТО (рис. 1) обумовлені веденням

"гібридної війни" Російською федерацією проти України. За таких умов, мало що залежить від захищеності ББМ, а насамперед від таких факторів, як: зовнішня політика держави, застосування РЛС типу "AN/TRPQ" та від вміння командира правильно та вчасно здійснювати маневрування, використовувати місцевість, організовувати розвідку, виявляти та ліквідувати ворожих коректувальників вогню, швидко залишати вогневі позиції і т. д.

Щоб об'єктивно визначити основні загрози для ББМ в ході АТО та ООС, доцільно не враховувати втрати від артобстрілів та зразки за номенклатурою РАО (рис. 2) [1].

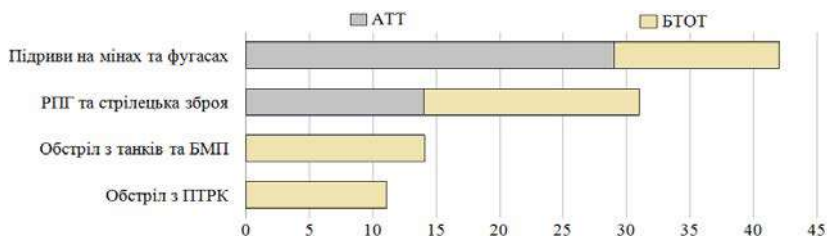


Рисунок 2. Основні загрози ББМ ЗС України у відповідності до їх бойових пошкоджень в ході АТО: АТТ – автомобільна техніка; БТОТ – бронетанкове озброєння та військова техніка

Отже, якщо не враховувати артилерійські обстріли, то з рис. 1-2 видно, що основними загрозами для ОВТ являються дві протилежні, як по технічному рівню, так і по способу застосування, групи засобів ураження: перша – міни та саморобні вибухові пристрої і друга – РПГ, ПТРК, СПГ та стрілецька зброя. Тому, саме ці засоби є найбільш небезпечними для ББМ, що є характерним і для інших локальних конфліктів. В загальному протитанкові міни, саморобні вибухові пристрої будемо називати в цій роботі вибухонебезпечні предмети (ВНП).

Результати оцінки напрямів розвитку ББМ за даними опитування 88 військовослужбовців Збройних Сил України з використанням методу попарного порівняння вказують, що найвищі значення вагових коефіцієнтів мають характеристики озброєння, потім захищеності (протимінний захист, захист від

гранат ручних протитанкових гранатометів та захист від куль Б-32 калібру 12,7 мм) та прохідності [2]. Отримані значення вагомості показників за даними опитування з використанням методу попарного порівняння можуть слугувати для оцінки пріоритетів розвитку вітчизняних бронетранспортерів та інших машин подібного класу. Для кожної групи значення вагових показників змінюються, однак для всіх груп спостерігається їх стала тенденція. Крім того така тенденція спостерігається й для середнього значення для всіх експертів (рис. 3).

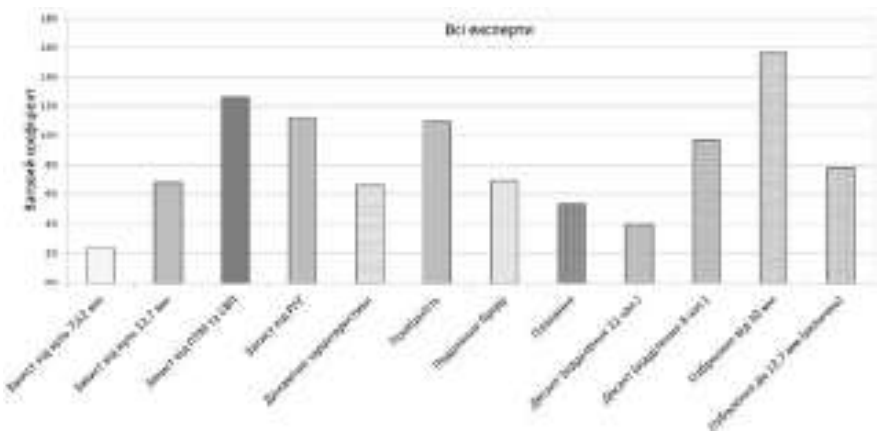


Рисунок 3. Середні значення вагових коефіцієнтів отриманні після опитування 88 експертів [2]

Зважаючи на значну частину ураження ВМП, РПГ й стрілецькою зброєю при проведенні АТО та ООС, та результатами експертного опитування, доцільно розглянути основні вимоги до забезпечення захисту від цих засобів ураження та напрями дослідження й реалізації підвищення захищеності від них.

Практичний досвід випробувань захищеності ББМ показує, що забезпечення якісного виготовлення зварних бронекорпусів є суттєвою запорукою забезпечення й захищеності. Тому на першому етапі доцільно з'ясувати проблеми, що існують при виготовленні вітчизняних бронекорпусів ББМ та шляхи їх вирішення.

## **Оцінка проблем виготовлення зварних бронекорпусів вітчизняних бойових броньованих машин.**

Від початку збройного конфлікту на сході України необхідність оновлення парку ББМ, що знаходяться на озброєнні ЗСУ набула особливої актуальності [3]. Переважну кількість нових зразків ББМ, що надходять у війська розроблено та виготовлено на державних та приватних підприємствах України.

Старіння виробничої бази, втрата кваліфікованих кадрів за часи відсутності держфінансування нових розробок у військовій сфері, відсутність необхідного досвіду у низки підприємств, переорієнтованих на виробництво військової техніки, обумовлюють чисельні випадки виявлення дефектів у ході випробувань та експлуатації нових вітчизняних ББМ. Особливо гостро ця проблема стосується ББМ легкої категорії за масою, бронекорпуси яких являють собою зварні просторові тонколистові конструкції, що складаються з зовнішніх панелей, виготовлених з легованих броньових сталей, з'єднаних між собою та з внутрішнім силовим каркасом. Виникнення тріщиноподібних дефектів на зварних бронекорпусах ББМ призводить до різкого зростання імовірності ураження екіпажу, що безумовно недопустимо. Крім того це підриває віру військовослужбовців, у захисних властивостях нових зразків вітчизняних ББМ.

Слід зазначити, що під час обговорювання зазначеної проблеми, основна увага військових експертів та посадових осіб, які приймають управлінські рішення, зосереджена на неякісній броньовій сталі та низькій підготовці зварювального персоналу [4,5]. Однак такі уявлення не зовсім відповідають дійсності. Адже невід'ємними факторами, що визначають відповідність виготовленого зразка ББМ заявленим ТТХ та впливають на захищеність її бронекорпусу виступають, як проектні рішення, так і технологія виготовлення, організація технологічної підготовки та виробничого процесу в цілому (рис. 4). З точки зору зварювального виробництва, відповідність бронекорпусу ББМ усім тактико-технічним вимогам та вимогам якості визначається сукупним впливом властивостей та якості основного металу (броньової сталі високої твердості),

конструктивних особливостей бронекорпусу, а також виробничих факторів (рис. 5).

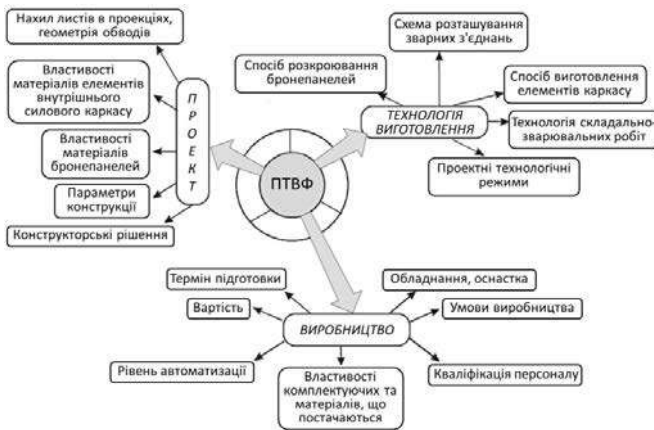


Рисунок 4. Проектно-технологічно-виробничі фактори (ПТВФ) захищеності бронекорпусів БМ [6]

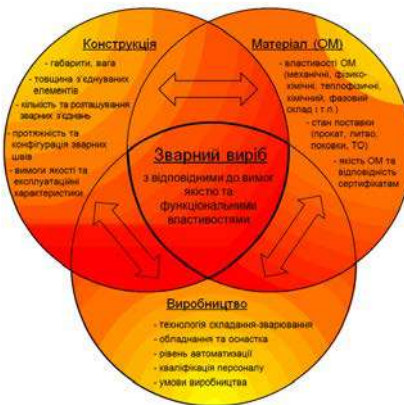


Рисунок 5. Концепція технологічної зварності

З цією метою проведено оцінку та систематизацію основних причин, що призводять до виникнення дефектів в зварних корпусах БМ легкої категорії за масою та визначення основних напрямів їх попередження для уникнення зростання імовірності загибелі екіпажу БМ.

## Проблеми матеріалу зварних бронекорпусів

На сьогоднішній день підприємствами ОПК України для виробництва корпусів нових БМ легкої категорії за масою застосовуються в основному закуплені закордоном броньові сталі високої твердості.

У країнах НАТО прокат з броньових сталей, за рівнем твердості, поділяється на три групи: 1) сталі з твердістю біля 400 HB (реально 210...470 HB) – т. зв. РНА-сталі (Rolled Homogeneous Armor), що нормуються за військовими ТУ США MIL-DTL-12560; 2) сталі з твердістю біля 500 HB (реально 477...534 HB) – ННА-сталі (High Hard Armor) згідно MIL-DTL-46100 та 3) сталі з твердістю не менше 570 HB – УНН-сталі (Ultra High Hard Armor) за MIL-DTL-32332.

У зварювальному виробництві корпусів БМ легкої категорії за масою переважно застосовують сталі 2-ї групи (таблиця 1). При цьому, для забезпечення необхідних службових властивостей листовий прокат зі сталей цієї групи загартовується з наступним низькотемпературним відпуском. В результаті матеріал набуває високих механічних властивостей (границя плинності не менше 1250 МПа, границя міцності більше 1450 МПа, при твердості біля 50 HRC) [7].

Таблиця 1. Умовний хімічний склад (максимальний вміст елементів) деяких ННА-сталей закордонного виробництва

Марка сталі	C,%	Mn,%	Si,%	Cr,%	Ni,%	Mo,%	P,%	S,%	B,%
Сталь марки 71	0.29	1.31	0.25	0.33	0.05	0.02	0.011	0.001	0.0033
ARMSTAL 500 (Польща)	0,32	1,20	0,50	0,90	1,10	0,30	□0,015	□0,01 0	0,003
Агмох 500Т (Швеція)	0,32	1,20	0,40	1,0	1,80	0,70	□0,015	□0,01 0	0,005
SWEBOR ARMOR 500 (Швеція)	0.32	0.79	0.30	0.98	0.03	0.14	0.010	0.002	-
SWEBOR ARMOR 560 (Швеція)	0,36	1,60	0,60	+	-	-	□0,020	□0,01 0	+
Miilux Protection 500 (Фінляндія)	0,30	1,70	0,70	1,50	0,80	0,50	□0,030	□0,01 5	0,004
Guardian 500/HB 500 MOD (Бельгія)	0,30	1,20	0,40	0,80	1,20	0,60	□0,015	□0,01 0	0,005
ATI 500+	0.29	0.64	1.29	1.63	2.14	0.48	0.009	0.001	-

+/- – міститься/відсутній в складі сталі, як легувальний елемент.

У табл. 1 наведено заявлений у рекламних проспектах виробників броньових сталей максимальний вміст легувальних елементів та домішок. Разом із цим, жодний з виробників не надає інформації стосовно мінімального гарантованого вмісту таких елементів, як вуглець, марганець, хром, нікель, молібден та бор, частка яких в складі сталі безпосередньо впливає на комплекс її механічних та технологічних властивостей після термічного зміцнення.

Аналіз фактичного складу найбільш активно застосовуваних у вітчизняному бронетанковому виробництві сталей ARMSTAL 500, Miilux Protection 500 та Quardian 500, за даними сертифікатів на листовий прокат, що надходив на підприємства, представлено на рис. 6-8. Символами білого кольору (не зафарбованими) позначено заявлений виробником максимальний вміст елементів.

За результатами проведеного аналізу, з 10 плавок сталі ARMSTAL 500 (рис. 6) 2 плавки взагалі не містять бор, 1 сертифікат термообробленого прокату не містить значень його механічних властивостей. Крім того, 2 плавки містять хром, нікель та молібден у більшій кількості, ніж зазначено у табл. 1.

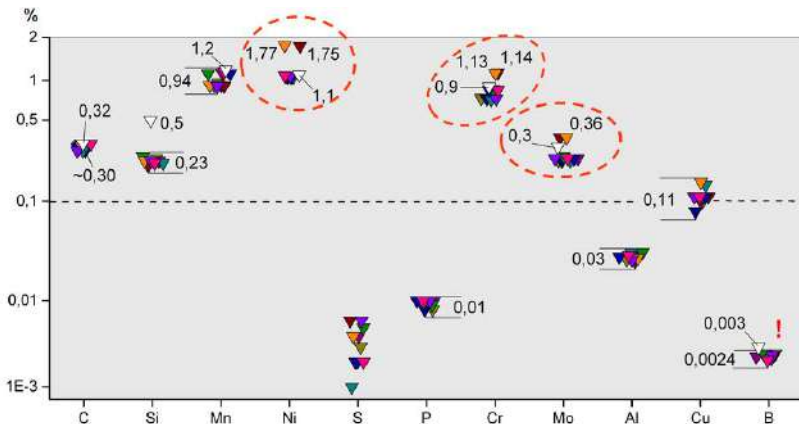


Рисунок 6. Фактичний хімічний склад досліджених плавок сталі ARMSTAL 500

У всіх 16 досліджених плавках сталі Quardian 500 (рис. 7) немає жодного легувального елемента, фактичний вміст якого досягав хоча б 1 %, 4 сертифікати термообробленого прокату не містять механічних властивостей.

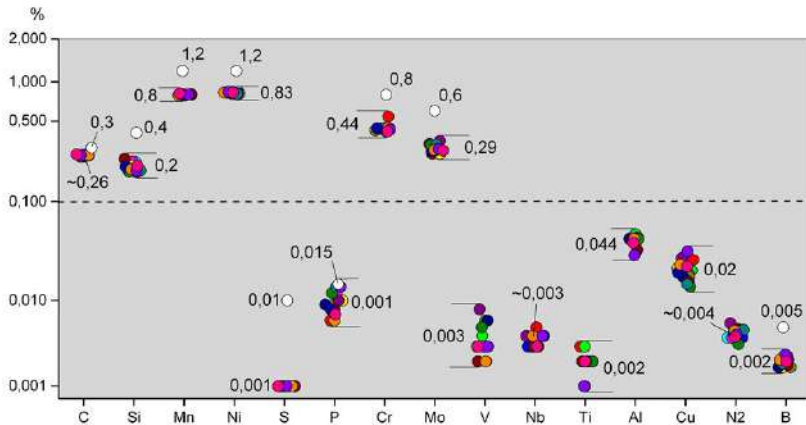


Рисунок 7. Фактичний хімічний склад досліджених плавок сталі *Guardian 500*

За результатами аналізу 20 плавок сталі *Millux Protection 500* (рис. 8), жодний сертифікат не містить даних про термообробку та механічні властивості прокату, прокат різної товщини однієї й тієї ж плавки має різний хімічний склад. При цьому у більшості досліджених плавок замість заявленої кількості нікелю та молібдену, як легувальних елементів (до 0,8 % та до 0,5 % відповідно), містяться лише їх сліди (< 0,1 %).

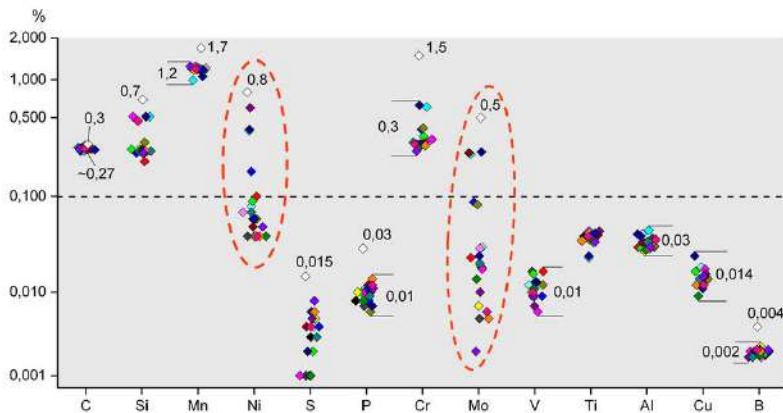
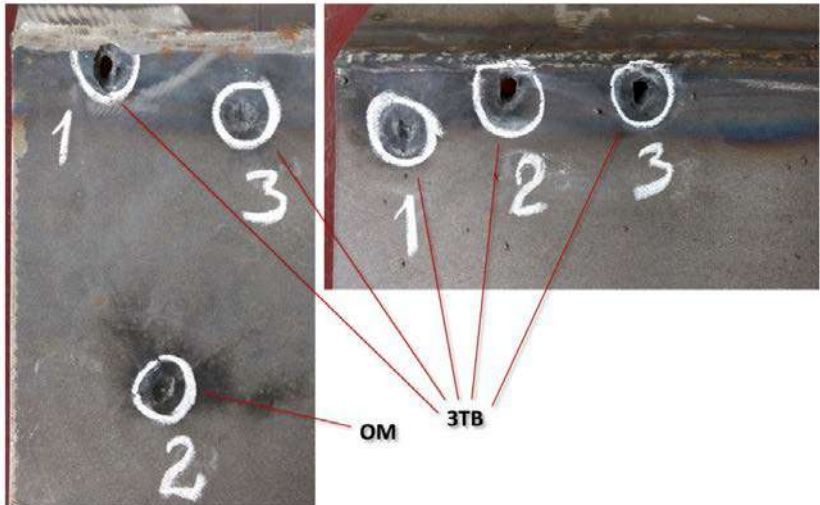


Рисунок 8. Фактичний хімічний склад досліджених плавок сталі *Millux Protection 500*

Характерним для всіх досліджених сталей є суттєво менший вміст визначних для їх механічних властивостей елементів, порівняно з рекламними даними. З урахуванням середнього фактичного складу, сталь ARMSTAL 500 згідно ГОСТ 4543-71 могла б одержати позначення 30ХГНМР, сталь Quardian 500 – 26ГНМР. Для порівняння наведемо можливі позначення за ГОСТ 4543-71 протикульових сталей високої твердості застосовуваних в СРСР: 26ГСМ, 22ХГСНМ, 35ХСН2М. Принциповою відмінністю закордонних бронесталей високої твердості від радянських аналогів, а також сучасних вітчизняних розробок [8] є відсутність легування кремнієм та мікролегування бором. За рахунок останнього, закордонним виробникам вдалося суттєво підвищити прогартовуваність сталі та зменшити вміст традиційних високовартісних легувальних елементів, в першу чергу нікелю та молібдену. Завдяки цим рішенням, спільно з сучасними технологіями позапичної та термомеханічної обробки, листовий прокат зі сталей наведених у таблиці 1, в стані поставки після термічного зміцнення може демонструвати механічні властивості не гірші від вітчизняних бронесталей високої твердості. Однак економне легування закордонних сталей, в першу чергу відносно невеликий фактичний вміст молібдену (до 0,3 %) та бору (до 0,002 %), обумовлює їх низьку відпускну стійкість. Так, виробник не рекомендує перебільшувати температуру нагрівання матеріалу вище 200 °С під час проведення технологічних операцій пов'язаних зі зварюванням або термічним різанням. Оскільки при електродуговому зварюванні перегрівання основного металу вище зазначеної температури неминуче, метал зони термічного впливу (ЗТВ) зварних з'єднань з цих сталей характеризується відносно протяжними (до 6...8 мм шириною) зменщеними внаслідок термічного відпуску ділянками [9-12]. В свою чергу, це обумовлює часті випадки невідповідності зварних складальних одиниць необхідному рівню протикульової (рис. 9) або протимінної стійкості. Крім того, проведення досліджень, з використанням апробованих числових моделей [13-15] також з високою імовірністю матиме сумнівний результат у зв'язку із складністю прогнозування механічних характеристик таких зварних з'єднань.



*Рисунок 9. Деградація балістичної стійкості зварних макетів з броньової сталі високої твердості під впливом обумовлених зварювальним теплом структурних перетворень (ОМ – основний метал, не вплинутий зварювальним теплом, ЗТВ – зона термічного впливу)*

Брак офіційно викладених у нормативній або технічній документації вимог до хімічного складу броньових сталей з чітко встановленими верхньою та нижньою межами вмісту всіх легувальних елементів та домішок, відсутність належним чином організованого вхідного контролю на деяких підприємствах ОПК негативно впливають на якість та спеціальні робочі властивості зварних складальних одиниць з цих матеріалів і, таким чином, експлуатаційну надійність виготовлених зразків ББМ. Звісно, фактичний, контроль балістичного та протимінного захисту ББМ здійснюється шляхом натурних випробувань. Однак високий рівень структурної та механічної неоднорідності одержуваних зварних з'єднань [16], обумовлений суттєвим розкидом хімічного складу та, відповідно, фізико-механічних властивостей листового прокату з броньової сталі закордонного виробництва вносить в такі випробування досить велику імовірнісну складову. В цьому випадку, для забезпечення гарантованого захисту особового складу ББМ вимушеним конструкторським рішенням може бути

тільки збільшення запасу по товщині броньової сталі та, як наслідок, зростання маси ББМ в цілому, що впливатиме на характеристики прохідності й рухомості зразка.

Прикладом нормативного документу, який регламентує вимоги до листового прокату з броньової сталі високої твердості, що надходить від виробника, є розроблені МО США технічні умови військового призначення MIL-DTL-46100E [17], які знаходяться у відкритому доступі. Вимоги до хімічного складу бронесталей згідно цього документу представлені в табл. 2.

*Таблиця 2. Вимоги до хімічного складу бронесталей високої твердості за MIL-DTL-46100E [17]*

Хімічний елемент	Граничний вміст для першої партії (% мас.)	Допустимі відхилення для всіх наступних партій (% мас.)
C	0,32	<sup>3)</sup>
Mn	Без обмежень, але якщо: < 1,00 > 1,00	± 0,15 ± 0,20
P	0,020 <sup>1)</sup>	<sup>3)</sup>
S	0,010 <sup>1)</sup>	<sup>3)</sup>
Si	Без обмежень, але якщо: < 0,60 > 0,60 to < 1,00 > 1,00	± 0,10 ± 0,15 ± 0,20
Ni	Без обмежень <sup>2)</sup>	± 0,25
Cr	Без обмежень, але якщо: < 1,25 <sup>2)</sup> > 1,25	± 0,15 ± 0,25
Mo	Без обмежень, але якщо: < 0,20 <sup>2)</sup> > 0,20	± 0,035 ± 0,075
V	Без обмежень <sup>2)</sup>	± 0,075
B	0,003	<sup>3)</sup>
Cu	0,25 <sup>2)</sup>	<sup>3)</sup>
Ti	0,10 <sup>2)</sup>	<sup>3)</sup>
Al	0,10 <sup>2)</sup>	<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup> Вміст P та S повинні утримуватись на найнижчому рівні, спільний вміст P + S не має перебільшувати 0,025 %.

<sup>2)</sup> Якщо фактичний вміст елемента не перебільшує 0,02 %, то в сертифікаті проставляється: < 0,02 %.

<sup>3)</sup> Вміст елемента не має перебільшувати наведене граничне значення.

### ***Проблеми зварювального виробництва корпусів ББМ***

Конструктивними особливостями зварних корпусів ББМ легкої категорії за масою є наявність великої кількості різнотовщинних зварних з'єднань та з'єднань під тупими й гострими кутами з товщиною з'єднаних елементів біля 5...25 мм, а також різнонаправлених зварних швів, що потребують зварювання

в складних просторових положеннях або використання спеціалізованого устаткування для переміщення зварюваних виробів. Це обумовлює переважне застосування у виробництві зварних бронекорпусів механізованого електродугового зварювання плавким електродом у захисному газі.

Від початку 80-х рр. минулого ст., у вітчизняному танкобудуванні, для зварювання у захисному газі протикульових сталей високої твердості почали застосовувати високолегований зварювальний дріт аустенітного класу Св-08Х20Н9Г7Т [18], аналогічний традиційно застосовуваному для з'єднання товстолистової протиснарядної броні. Наразі ця марка зварювального дроту поступово замінюється на виробництві вітчизняними та закордонним аналогами (табл. 3).

*Таблиця 3. Хімічний склад наплавленого металу для деяких дротів застосовуваних при зварюванні бронесталей*

Зварювальний дріт	Масова частка елементів, %									
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Ti	Cu	S	P
Св-08Х20Н9Г7Т (ГОСТ 2246-70)	0,09	0,6	6,8	19,8	9,1	-	0,64	-	0,004	0,008
ESAB OK Autrod 16.95 – G 18 8 Mn (ДСТУ EN ISO 14343)	0,07	0,9	6,9	17,9	7,7	0,2	-	0,2	0,01	0,02
ХОРДА 307Ti – G 18 8 Mn Ti (ДСТУ EN ISO 14343)	0,08	0,70	5,9	17,9	8,0	-	0,47	-	0,011	0,024

Як видно з таблиці 3, у шві намагаються одержати високолеговану хром-нікель-марганцеву сталь, що не потерпає поліморфного перетворення та зберігає аустенітну структуру до повного остигання зварного з'єднання. За умови призначення раціональних параметрів режиму зварювання та правильної техніки виконання зварних швів, це дозволяє уникнути утворенню тріщин в зварних з'єднаннях, завдяки високому рівню пластичності металу аустенітного зварного шва та високій розчинності водню у ньому.

Аустенітний метал зварного шва характеризується високою живучістю під обстрілом, тобто здатністю не руйнуватись при нанесенні уражень поза межами шва. Однак, при застосуванні подібних зварювальних матеріалів, рівномірність металу зварного з'єднання не забезпечується, а необхідний рівень кулестійкості зварних вузлів досягається їх конструктивним виконанням. А саме –

застосуванням зварних з'єднань, в яких одна з деталей повністю закриває шов або спеціальних вузькозасорних, шипових, пазових і т. п. зварних з'єднань.

Неопрацьованість на виробництві технології виконання подібних з'єднань зі спеціальних сталей при застосуванні високолегованих аустенітних дротів та сучасних захисних газових сумішей спричиняє масові дефекти форми швів, а саме – несплавлення крайок та непровари (рис. 10).

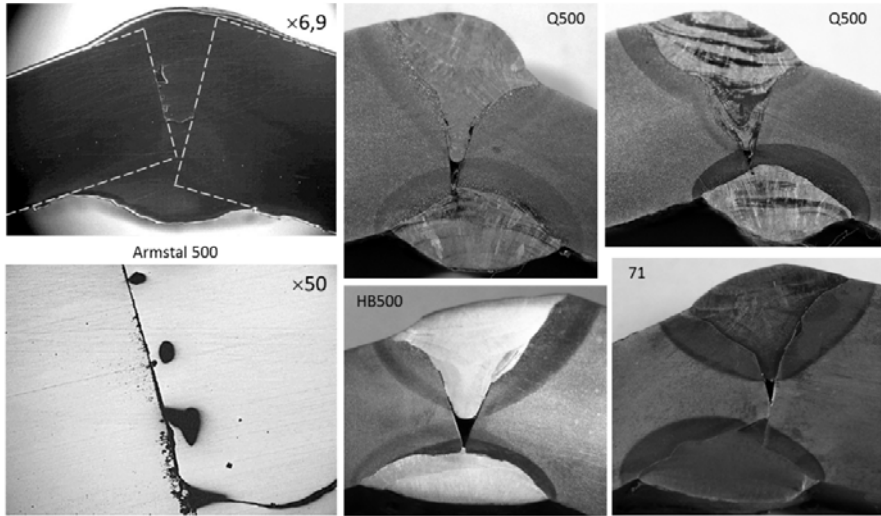


Рисунок 10. Непровари зварних з'єднань броньових сталей високої твердості:  
*ARMSTAL 500, Quardian 500, HB 500 MOD, сталь «71»*

З урахуванням зазначеної раніше надмірної теплової чутливості закордонних бронесталей, забезпечення при їх зварюванні якісного формування металу шва, одночасно з попередженням гартівних тріщин та запобіганням знеміцненню окремих ділянок ЗТВ, являє собою складну науково-технічну задачу. З представленої на рис. 11 діаграми температурного режиму зварювання термозміцнених сталей видно, що за відсутності попереднього підігрівання, діапазон допустимих режимів зварювання для цих матеріалів виявляється доволі вузьким. Якщо погонна енергія зварювання виходитиме за межі цього діапазону, підвищуватиметься небезпека утворення гартівних тріщин, або, навпаки, за

надмірного тепловкладення в зварюваний метал, відбуватиметься знеміцнення ЗТВ зварних з'єднань й, відповідно, зростатиме імовірності її пробиття засобами ураження.

Проведені дослідження з впливу зварювального тепла на структуру, фазовий склад та механічні властивості металу ЗТВ закордонних броньових сталей високої твердості [9,10] вказують на необхідність обмеження погонної енергії зварювання так, щоб швидкість охолодження металу ЗТВ у міжкритичному інтервалі температур була не меншою за прибіл. 15 °C/c. На практиці виконання цієї умови не завжди може забезпечуватись підбором параметрів режиму зварювання, який налаштовується по зварювальному дроту, а не по основному металу. Адже аустенітний дріт має значно нижчу теплопровідність та меншу температуру плавлення, ніж основний метал.



Рисунок 11. Діаграма температурного режиму зварювання загартованих низьковідпущених сталей [19]

Перспективними шляхами вирішення проблеми оптимізації температурного режиму зварювання броньових сталей високої твердості аустенітними матеріалами можуть бути впровадження зварювання пульсуючим струмом, застосування спеціалізованої тепловідвідної оснастки, зварювання на

прямій полярності, застосування спеціалізованих газових сумішей для підвищення ККД дуги, впровадження гібридних лазерно-дугового та плазмово-дугового процесів. Реалізація цих заходів потребує на сьогоднішній день проведення широкого кола пошукових, параметричних та експериментальних досліджень.

Крім проблем технологічного характеру, зварювальне виробництво корпусів ББМ на багатьох вітчизняних підприємствах потерпає від недооснащеності спеціалізованим устаткуванням для складання та переміщення зварюваних конструкцій. В першу чергу це стосується заводів, які до 2014 р. виконували лише дрібносерійний ремонт військової техніки, що перебувала на озброєнні ЗСУ, а також деяких комерційних підприємств, що в останні три роки розпочали модернізацію ще «радянських» зразків ББМ або розробку та виготовлення власних зразків.

На рис. 12 наведено приклади вимушено архаїчної організації складально-зварювальних робіт через зазначені причини. Можна бачити, що складання корпусів ББМ здійснюється за допомогою примітивних пристосувань, які приварюються до поверхні з'єднаних деталей. Це ускладнює одержання необхідної геометричної форми зварних вузлів та виробів та дотримання розмірної точності конструктивних елементів зварних швів. Також знижується продуктивність складально-зварювальних робіт через необхідність видалення приварених до корпусу пристосувань після завершення зварювання. Відбувається небажане перегрівання чутливих до зварювального тепла сталей у місцях не передбачених конструкторською документацією. Через розміщення зібраних корпусів на нерухомих опорах, зварювальник вимушений виконувати шви не тільки в нижньому та горизонтальному положеннях, а і на вертикальній площині, у важкодоступних місцях.

Приклади сучасних рішень з оснащення складально-зварювальних ділянок необхідним спорядженням для виробництва корпусів ББМ наведено на рис. 13. При цьому слід відмітити, що ще наприкінці 90-х рр., під час виконання контракту для інозамовника, українським підприємством «Азовмаш»



Рисунок 12. Приклади низького рівня організації складально-зварювальних робіт корпусів ББМ через брак спеціалізованого устаткування для складання та переміщення зварюваних конструкцій

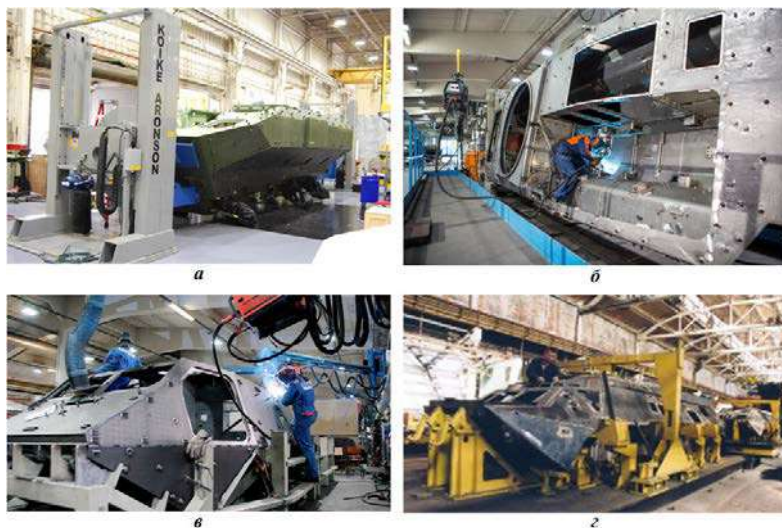


Рисунок 13. Приклади виробництва, оснащених необхідним устаткуванням для складання та переміщення зварюваних корпусів ББМ: а) плаваючих бронетранспортерів ACV 1.1 для Корпусу морської піхоти США (BAE Systems) [20]; б, в) бронетранспортерів Patria AMV та Patria Pasi APC (Patria Plc) [21]; г) бронетранспортерів БТР-3 (Азовмаши, 2000 р.) [22]

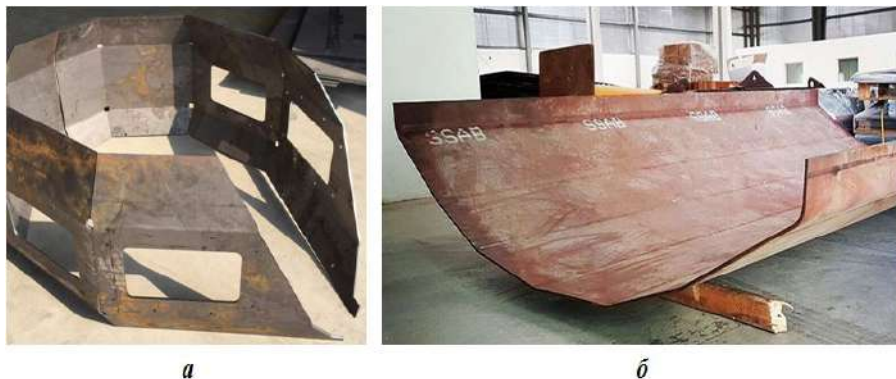
застосовувались спеціалізовані складально-зварювальні стапелі при поточному виготовленні корпусів БТР-3 (рис. 13 з).

Забезпечення складальних та зварювальних ділянок необхідним спорядженням та технологічною оснасткою не тільки підвищує продуктивність виготовлення зварних бронекорпусів, але і покращує умови праці та зменшує навантаження на виробничий персонал. У свою чергу, це знижує імовірність виникнення дефектів зварних з'єднань та підвищує експлуатаційну надійність готових виробів. Адже кожний геометричний дефект або дефект суцільності в металі зварного шва виступає потужним концентратором напружень та здатний, в умовах дії експлуатаційних навантажень (погодні фактори, вібрація, вибухові та ударні впливи), виступати осередком крихкого руйнування корпусу БМ.

### **Конструктивні особливості корпусів вітчизняних легких БМ**

До конструктивних особливостей корпусів вітчизняних БМ легкої категорії за масою, в першу чергу різноманітних зразків запропонованих комерційними виробниками, слід віднести надмірну кількість зварних з'єднань. Застосування розглянутих вище сталей закордонного виробництва (таблиця 1), враховуючи високу чутливість цих матеріалів до зварювального тепла, вимагає додаткових заходів для забезпечення належного рівня бронестійкості металу зварних з'єднань. Як то, екранування корпусу додатковими елементами бронезахисту або застосування додаткових броненакладок в місцях зварного з'єднання. Крім цих підходів, конструкції корпусів сучасних зразків БМ закордонної розробки характеризуються широким впровадженням штампованих та гнутих деталей (рис. 14).

Зрозуміло, що для широкого застосування у виробництві вітчизняних БМ легкої категорії за масою гнутих деталей необхідне дооснащення підприємств відповідним устаткуванням для обробки тиском. Проте загальне зменшення числа зварних швів у конструкції знижуватиме імовірність виникнення тріщин та ризику розриву бронекорпусів при навантаженні вибухом через знеміцнення основного металу.



*Рисунок 14. Гнуті деталі у виробництві ББМ легкої категорії за масою компанії Advanced Armour Engineering [23]: а) заготівка бапти зі сталі Ruuki Ramor 500; б) заготівка днища MRAP зі сталі Armoх 500Т*

Таким чином з проведеної оцінки можна виділити наступні актуальні проблеми вітчизняного виробництва зварних корпусів ББМ легкої категорії за масою:

1. Наявність у прокату з закордонних броньових сталей суттєвого розкиду за хімічним складом та відсутність належного входного контролю хімічного складу і механічних властивостей одержуваних матеріалів з боку підприємств-виробників.

2. Невідповідність організації зварювального виробництва та застосовуваної технології зварювання на ряді вітчизняних підприємств вимогам, обумовленим зварністю закордонних броньових сталей високої твердості, рекомендаціями виробників сталей з їх зварювання та термічної обробки, а також типам зварних з'єднань та зварювальним матеріалам, зазначеним у конструкторській та технологічній документації на виріб.

3. Недостатня кваліфікація робітників-зварювальників, відсутність посади головного зварювальника на деяких підприємствах.

4. Сукупний вплив наведених факторів обумовлює недостатній рівень технологічної міцності зварних вузлів з закордонних броньових сталей, експлуатаційної надійності та балістичної і вибухової стійкості виготовлених корпусів ББМ.

5. Вирішення зазначених проблем потребує наступних заходів:

6. Розробка технічних умов (ТУ) на прокат листовий малої та середньої товщини з броньових сталей високої твердості з регламентованими вимогами до хімічного складу, фізико-механічних властивостей, балістичної стійкості та, за потреби, ін. характеристик.

7. Впровадження розроблених ТУ в систему вхідного контролю підприємств задіяних у виготовленні ББМ легкої категорії за масою.

8. Конструювання та виготовлення спеціалізованої складально-зварювальної оснастки для вітчизняних підприємств з виробництва корпусів ББМ, збільшення на них номенклатури устаткування для переміщення зварюваних конструкцій, підвищення рівня механізації та автоматизації зварювальних робіт, впровадження неруйнівних методів вихідного та проміжного контролю якості.

9. Підвищення ПМС, живучості та технологічної міцності зварних з'єднань броньових сталей високої твердості шляхом оптимізації конструкції зварних вузлів, раціонального вибору зварювальних матеріалів, розробки та впровадження технологій зварювання зі зниженим тепловим впливом на основний метал.

10. Розробка та впровадження на виробництві технологічного регламенту (ТР) зі зварювання броньових сталей високої твердості, організація навчання та підвищення кваліфікації робітничого та інженерного персоналу підприємств, задіяного у зварювальному виробництві корпусів ББМ.

### **Протимінний захист бойових броньованих машин.**

Значне поширення протитанкових мін (ПТМ) і висока імовірність ураження ББМ (0,9) [24], що потрапляють у зону їх реагування за відсутності систем протимінного захисту, зумовлює необхідність підвищення рівня протимінного захисту ББМ до дії уражаючих факторів вибуху. Крім того співвідношення вартості основних зразків ББМ до вартості ПТМ складає від близько 600 до 14000 разів (рис. 15).



Рисунок 15. Співвідношення вартості основних зразків БМ до вартості ПТМ

Щоб визначити напрями і способи протидії ПТМ, необхідно їх класифікувати та визначити особливості застосування. Загальноприйняту класифікацію ПТМ наведено на рис. 16 [25]. За цією класифікацією виокремлюють такі ПТМ:

- 1) за способом завдання збитку БМ – протиусеничні, протиднищеві, протибортові та комбінованої дії, що уражають ходову частину або днище залежно від умов спрацювання;
- 2) за факторами ураження – фугасної дії, кумулятивної дії, кумулятивно-фугасної, осколкової та осколково-фугасної дії;
- 3) за типом датчика цілі – контактний (механічний, гідромеханічний), неконтактний (магнітний, сейсмічний, акустичний, інфрачервоний, оптичний) та комбінований;
- 4) за способом встановлення (вручну, дистанційно, засобами механізації).

Відповідно до прийнятої класифікації ПТМ (рис. 16) проведений їх аналіз з використанням даних, наведених в працях [25,26], для визначення напрямів захисту БМ. Узагальнені тактико-технічні характеристики промислових

інженерних протитанкових і протипіхотних мін, що становлять небезпеку для ББМ, наведено у праці [25]. Загальна кількість ПТМ у вибірці становить 231 зразок.

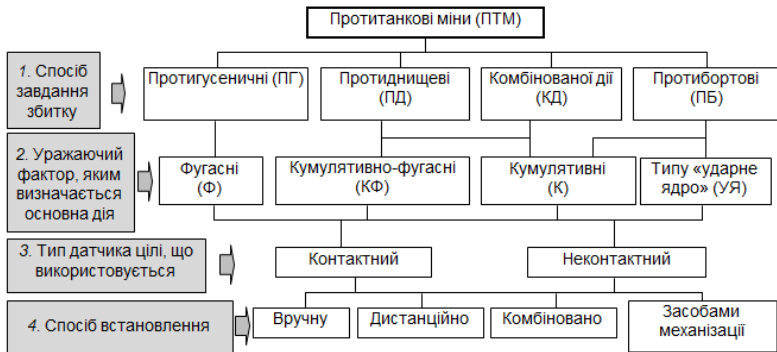


Рисунок 16. Класифікація протитанкових мін [25]

У різних ПТМ використовується ВР різного типу та різної маси. Для об'єктивного порівняння ПТМ масу ВР наведена в еквіваленті з тринітротолуолом (ТНТ), що розраховано за виразом [27]:

$$m_{екв} = m_{ВР} * (Q_{ВР} / Q_{ТНТ}), \quad (1)$$

де  $m_{екв}$  – еквівалентна маса ТНТ,  $m_{ВР}$  – маса ВР,  $Q_{ВР}$  – теплота вибуху ВР;  $Q_{ТНТ}$  – теплота вибуху ТНТ.

Так, 52 % ПТМ за способом завдання збитку є протигусеничними, 14 % – протиднищеві, 29 % можуть уражати або днище, або ходову частину залежно від умов спрацювання і тільки 5 % мін можуть уразити ББМ з бокової проекції (рис. 17). Великий відсоток протигусеничних ПТМ та комбінованої дії, основний уражаючий фактор яких визначається фугасною дією, вказує на те, що ББМ буде уражено з більшою імовірністю саме таким типом мін.

Основну частину розглянутих ПТМ складають фугасні ПТМ – 58 % і кумулятивні – 28 % (рис. 18). При цьому 74 % кумулятивних ПТМ обладнані контактним підривноком.

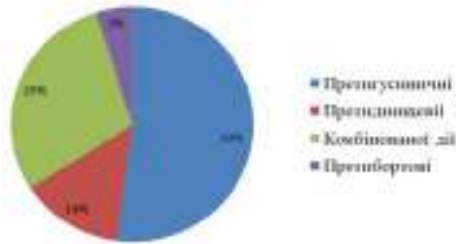


Рисунок 17. Розподіл ПТМ за способом завдання збитку

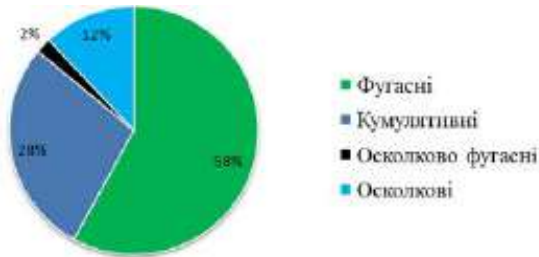


Рисунок 18. Розподіл ПТМ за уражаючим фактором, яким визначається їх основна дія

В останні десятиріччя триває вдосконалення ПТМ, насамперед підривача. За типом підривачі, застосовані у ПТМ, поділяють на дві групи: міни з неконтактним підривачем (26 % розглянутих мін), переважно магнітним, і з контактним підривачем (74 % розглянутих мін), переважно натискної дії (рис. 19).

Аналіз тенденцій розвитку ПТМ показує збільшення кількості типів ПТМ з неконтактним підривачем (мін третього покоління) і скорочення кількості типів ПТМ натискної дії. При цьому вартість мін третього покоління перевищує вартість мін першого покоління приблизно в 150 разів [28]. Нині використовуються електронні підривники зі штучним «інтелектом». Однак поряд із підвищенням ефективності цього покоління мін значно зростає їх ціна порівняно з мінами перших поколінь [28]. З огляду на це міни останніх поколінь можуть бути застосовані з малою імовірністю в умовах обмежених військових конфліктів. В АТО та ООС ЗС України і незаконні збройні формування

застосовують, як правило, ПТМ з натискним датчиком цілі. Це пов'язано з тим, що такі міни поля встановлюють практично на необмежений час, а ПТМ з магнітним датчиком цілі можуть бути встановлені на термін до одного місяця з необхідністю подальшої заміни елементів живлення.



*Рисунок 19. Розподіл мін за типом підривача*

За результатами аналізу промислових ПТМ та СВП можна зробити такі висновки: ББМ будуть уражені з більшою імовірністю мінами фугасної дії в порівнянні з іншими типами ПТМ; активна система протимінного захисту не виключає спрацювання ПТМ, оскільки 74 % мін обладнані контактним датчиком цілі, що потребує поліпшення пасивного протимінного захисту ББМ.

В роботі [29] представлені результати кластерного аналізу протитанкових мін Російської Федерації за обраними класифікаційними ознаками та масою вибухової речовини. Отримані групи кластерів (рис. 20) ПТМ із врахуванням кількості енергії, що поглинається ґрунтом, можна використовувати при формуванні вимог до рівня протимінного захисту вітчизняних ББМ.

За результатами дослідження [29] для ББМ 1-й рівень протимінної стійкості доцільно висувати до їх ходової частини, так як до цього кластеру відносяться ПТМ, що дистанційно встановлюються. Вимоги до ББМ, що до забезпечення 5-го рівня протимінної стійкості недоцільні у зв'язку із знаходженням в цьому кластері тільки однієї міни ТМ-62Д, що споряджена МС. Однак відкидати застосування такої міни також не варто. Зважаючи на масовість мін, що входять до 2-ї, 3-ї та 4-ї груп, актуальним є захист від них.

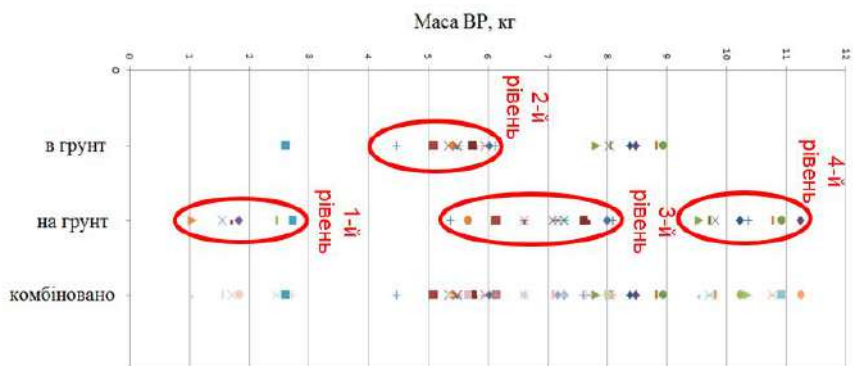


Рисунок 20. Рівні протимінної стійкості ББМ [29]

Враховуючи отриманні розрахункові значення можна зробити висновки, що 2-й і 3-й рівні є близькими до вимог ДСТУ STANAG 4569 [30]. Однак встановленні значення 4-го рівня протимінної стійкості на рівні 10 кг не відповідає розрахованим значенням 11-11,5 кг, що знижує рівень захищеності особового складу при підриві ББМ на ПТМ РФ. Крім того, враховуючи можливість встановлення ПТМ типу ТМ-62, на ґрунт та в ґрунт, найбільш раціональним є встановлення вимог до ПМС ББМ на рівні 8 кг.

Зважаючи на значну кількість ПТМ, що обладнані контактним датчиком цілі, розвиток системи пасивного протимінного захисту ББМ на сьогодні залишається актуальним. Однак побудову такої системи доцільно здійснювати ґрунтуючись на основних принципах її функціонування та взаємодії уражаючих факторів із конструкцією та особовим складом.

Дію ударної хвилі (УХ) вибуху ПТМ на конструкцію різних зразків ББМ можна класифікувати за чотирма різними основними ознаками (рис. 21):

- ✓ руйнування конструкції – вибухове навантаження є достатньо потужним, щоб зруйнувати конструкцію (перевищити межі допустимих деформацій матеріалів конструкції), як правило розпочинається через руйнування зварних з’єднань з подальшим переходом на основний метал;
- ✓ локальне руйнування (пробиття) корпусу – може бути спричинене або кумулятивними мінами, що призводять до пробиття днища зразка, або

внаслідок конструктивних недоліків днища (як правило нерациональне застосування ребер жорсткості для підсилення ПМС ББМ може мати зворотній ефект та призводити до утворення концентраторів напружень та спричиняти локальні розриви днища);

- ✓ деформації днища (конструкції) – є наслідком дії УХ вибуху на днище, однак при конструктивних недоліках значення динамічних деформацій днища може перевищувати зазори між елементами конструкції зразка, що кріпляться до днища, та ногами членів екіпажу та десанту зразка, це в свою чергу призведе до їх ураження;
- ✓ підкидання зразка – у певних співвідношеннях маси зразка до маси вибухової речовини та забезпечені надлишкової жорсткості конструкції зразка, значення отриманого імпульсу є достатнім для значного його підкидання, що в свою чергу призводить до виникнення значних локальних та глобальних прискорень на робочих місцях екіпажу та десанту ББМ й можливості їх ураження.

Безумовно, наведена на рис. 21 класифікація є умовним розділенням пошкоджень конструкції зразка, так як при підриві ББМ на ПТМ як правило спостерігаються або всі або декілька наслідків. Разом з тим такий розподіл дає можливість розділити технічні рішення які направленні на усунення таких наслідків відповідно до прийнятої класифікації (рис. 21).

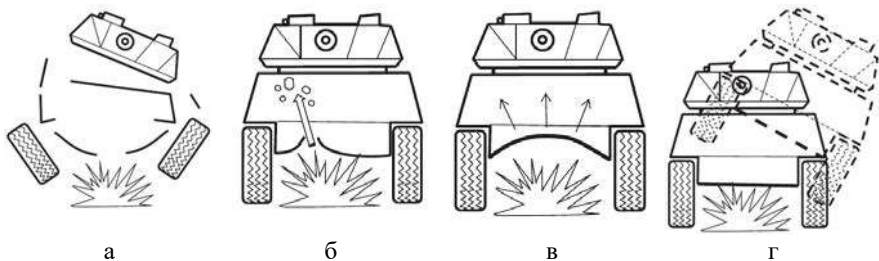


Рисунок 21. Класифікація пошкоджень ББМ внаслідок підриву на ПТМ: а – втрата цілісності конструкції, б – локальне руйнування (пробиття) корпусу, в – деформації днища (конструкції), г – підкидання зразка [31]

Логічним буде припустити, що основними принципами до зменшення пошкоджень зразка та зменшення імовірності травмування особового складу є відбиття частини енергії УХ від конструкції зразка для зменшення її загального імпульсу та часткове поглинання енергії УХ, для забезпечення значень прискорень в межах допустимих для внутрішнього обладнання та особового складу (рис. 22). Завданням при забезпеченні протимінної стійкості ББМ є визначення максимального імпульсу конструкції, що може бути отриманий при підриві, передбачення конструктивних заходів для його часткового відхилення й поглинання, на рівні, що забезпечить допустимі навантаження на особовий склад та внутрішнє обладнання, а також прогнозований стан конструкції ББМ.

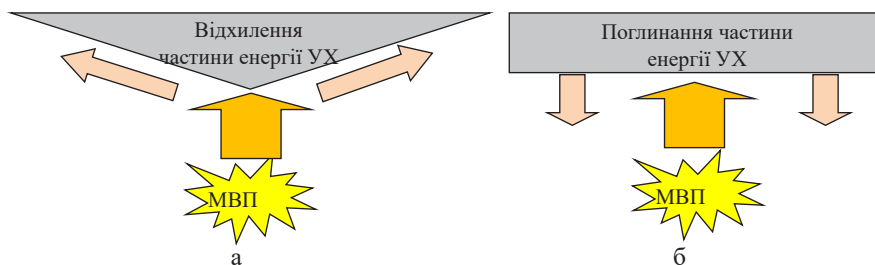


Рисунок 22. Принципи зменшення пошкоджень зразка та ураження особового складу при підриві: а – відбиття частини енергії УХ, б – поглинання частини енергії УХ

Під час підриву ББМ відбувається комбінований вплив уражаючих факторів вибуху на членів екіпажу, що призводить до руйнування ділянок їх тіл або відривів сегментів кінцівок у поєднанні з різними іншими пошкодженнями (відкритими і закритими травмами, осколковими пораненнями), термічними (опіками) і хімічними (токсичними продуктами) ураженнями. Процес підриву зразка ББМ можна умовно розділити на два етапи: локальні деформації (прискорення) корпусу та глобальна (загальна) реакція конструкції зразка (рис. 23), що призводять до різних значень навантажень на конструкцію зразка та на організм людини. У роботі [32] приведені дані експерименту, які свідчать, що при локальному навантаженні максимальна сила стиснення в гомілковій

кістці виникає в часі через 5-10 мс, при цьому значення навантажень при глобальному ефекті метання ББМ є незначними. Таке є характерним і для інших частин тіла (рис. 24-25). Тобто, по суті при дії локальних реакцій конструкції зразка працюють захисні елементи конструкції на відхилення та поглинання частини енергії зразка, при загальному прискоренню ББМ (глобальному ефекті) відсутність ураження досягається за рахунок кріплення організму людини ремнями безпеки до сидіння та забезпечення відсутності його ураження вторинними осколками (внаслідок відколів броні), елементами (деталлями) внутрішнього обладнання чи екіпірування (спорядження).

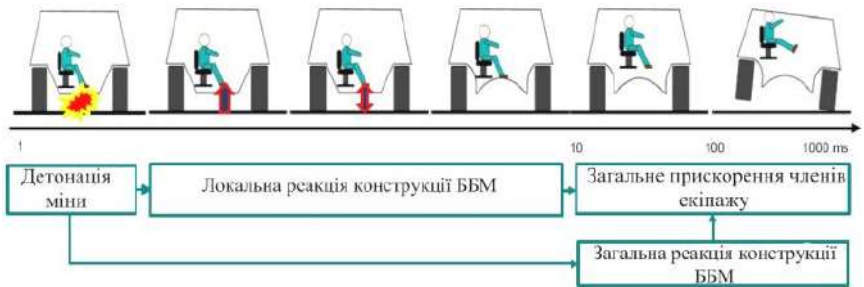


Рисунок 23. Часові інтервали реакції конструкції ББМ та екіпажу внаслідок вибуху ПТМ

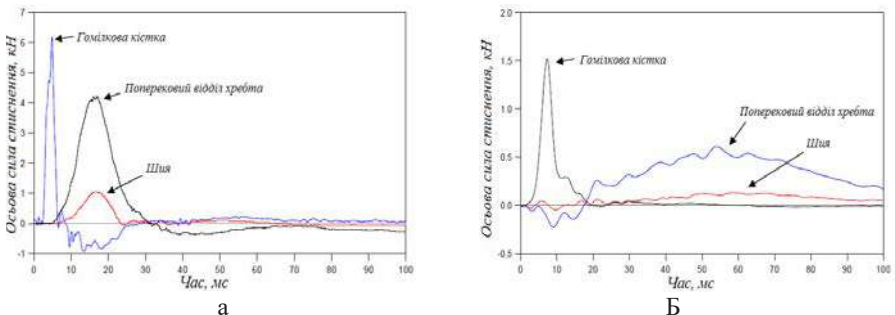


Рисунок 24. Осьова сила стиснення в різних частинах тіла при навантаженні від вибуху МВП під ББМ а – локальне, б – глобальне

Специфіка і тяжкість поранення у разі заброньової дії вибуху ПТМ залежить від факту пробиття чи не пробиття днища ББМ [33]. Із руйнуванням

корпусу шансів вижити у членів екіпажу дуже мало, тому що вони зазнають впливу усіх уражаючих факторів, тому цілісність корпусу ББМ при подальших дослідженнях приймається як обов'язковий показник. Під час дії імпульсних ударних прискорень, тіло людини і його частини зміщуються відносно сидіння, а також можливе вторинне зіткнення з перешкодами. Великого ризику зазнають голова і кінцівки, тому що ці частини тіла мають більше ступенів свободи, на відміну від тулуба, рух якого обмежений ремнями безпеки, що вимагає передбачити в конструкції ББМ додаткові заходи.

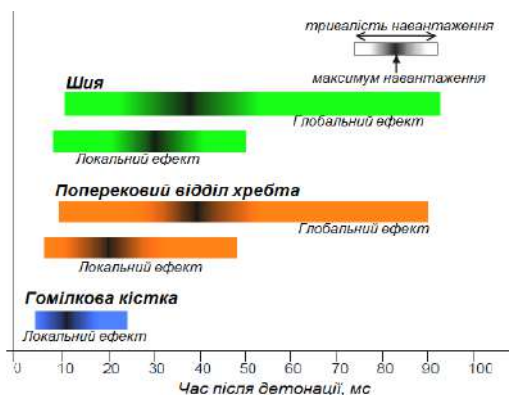


Рисунок 25. Часові інтервали досягнення максимуму навантаження в частинах тіла людини після підриву ББМ на МВП

З розглянутих принципів функціонування системи пасивного протимінного захисту можна сформувані основні напрями її побудови.

Зважаючи на економічні обмеження при розробці зразків ББМ раціональним підходом до їх побудови, в частині захищеності є створення базового зразка ББМ із заданим мінімальним рівнем захищеності з можливістю його підвищення за рахунок встановлення додаткових захисних структур. При цьому ефективність їх функціонування визначатиметься попередньо передбаченою можливістю їх встановлення. Прийнята у вітчизняному виробництві ББМ практика підвищення захищеності передбачає встановлення захисних структур у готову конструкцію. При цьому часто масо-габаритні

обмеження не дозволяють встановлювати захисні структури з раціональними параметрами, що в свою чергу призводить до незадовільного рівня протимінної стійкості вітчизняних ББМ.

Загальна структура запропонованої системи пасивного протимінного захисту ББМ наведена на рис. 26. Для забезпечення її необхідної ефективності на зразку ББМ мають бути передбачені конструктивні заходи, а саме: збільшення кліренсу (дорожнього просвіту); геометричні параметри конструкції зразка (товщина, кути нахилу, маса і т.п.); вставки в колеса (Run Flat); геометрія підвіски зразка (наявність здаючих елементів); геометрія (форма) колісних ніш; силова конструкція днища та корпусу (ребра жорсткості, елементи підсилення і т.п.); конструкція дверних замків десанту та екіпажу; матеріали конструкції та технології її виготовлення (зварні з'єднання та ін.).

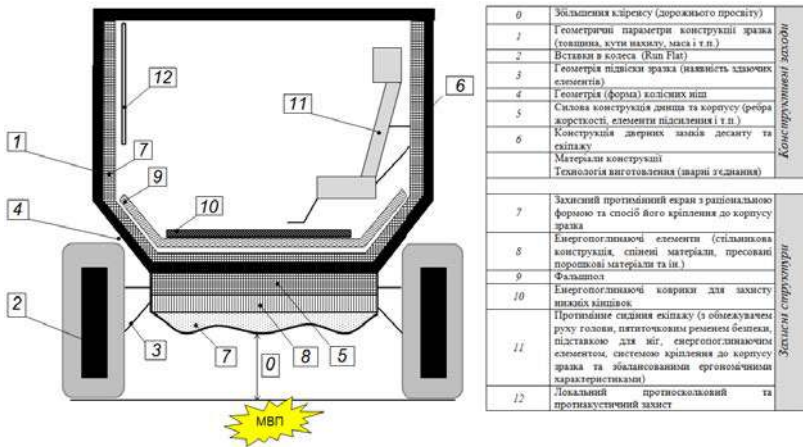


Рисунок 26. Структура запропонованої СПМЗ ББМ

Конструкція зразка ББМ має передбачати встановлення захисних структур, що дозволить підняти рівень протимінної стійкості із базового до необхідного, при необхідності залежно від специфіки завдань. До захисних структур відноситься: захисний протимінний екран з раціональною формою та способом його кріплення до корпусу зразка; енергопоглинаючі елементи (стільнікова конструкція, спінені матеріали, пресовані порошкові матеріали та ін.);

фальшпол; енергопоглинаючі коврики для захисту нижніх кінцівок; протимінне сидіння екіпажу (з обмежувачем руху голови, п'ятиточковим ременем безпеки, підставкою для ніг, енергопоглинаючим елементом, системою кріплення до корпусу зразка та збалансованими ергономічними характеристиками); локальний протиосколковий та протиакустичний захист.

Таким чином, концепція побудови системи пасивного протимінного захисту ББМ має ґрунтуватись на передбаченні в його конструкції можливості встановлення додаткових захисних структур, для поетапного підвищення рівня протимінної стійкості відповідно існуючим загрозам, типу та завданням, що виконуються (рис. 27).

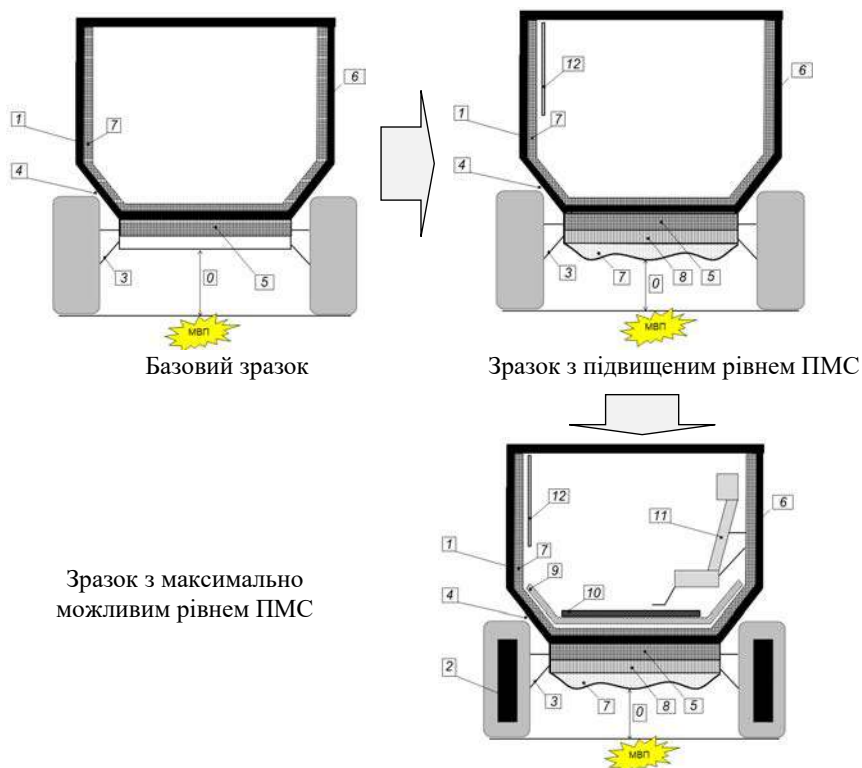


Рисунок 27. Послідовність забезпечення ПМС ББМ (позначення складових наведено на рис. 26)

Основними технічними рішеннями, що сприяють вдосконаленню *конструктивних заходів* системи пасивного протимінного захисту є [34-39]:

збільшення дорожнього просвіту, при можливості найбільш низького розміщення центру мас машини;

забезпечення міцності і жорсткості корпусу за рахунок застосування силових каркасів, що мінімізують деформацію та збільшують жорсткість корпусу (використання ребер жорсткості, балок і стійок);

розміщення екіпажу та десанту в броньованому відділенні («капсулі»), змонтованому на базовому шасі;

застосування протимінних екранів, раціональної до дії вибуху форми днища та багатошарового днища з енергопоглинаючими елементами;

спрощення конструкції колісних ніш (або уникнення їх виконання) та інших деталей на корпусі, що створюють перешкоду для ударної хвилі вибуху та акумулюють її енергію;

застосування в конструкції ходової частини протимінних коліс, дисків та стійких до вибуху гусеничних стрічок;

передбачення в конструкції ходової частини та корпусу ББМ здаючих ланок (елементів).

Основні технічні рішення, що сприяють вдосконаленню *захисних структур* системи пасивного протимінного захисту є та їх максимально ефективному використанню є:

✓ розміщення внутрішнього обладнання, паливних баків, сидінь екіпажу та десанту на максимально можливій відстані від днища;

✓ застосування енергопоглинаючих конструкцій в тому числі сидінь екіпажу та десанту, з кріпленням до бортів або даху машини;

✓ використання екіпажем захисних шоломів, бронежилетів та спеціалізованого взуття;

✓ застосування підставки для ніг, що не кріпиться до днища машини, або енергопоглинаючих ковриків;

✓ застосування систем фіксації (3-х,4-х,5-ти або 6-ти точкові ремені безпеки) та підголівників з обмежувачами руху голови людини в сторони;

- ✓ використання внутрішньої підлоги на пружних елементах та установка підбою, що зводить до мінімуму дію осколків при пробитті корпусу;
- ✓ надійне закріплення переносного обладнання та екіпування.

При цьому в конструкції системи пасивного протимінного захисту необхідно мінімізувати зварні шви, оглядові люки на днищі та ін. (доцільно проводити заміну технологічних операцій зварювання на гнуття броньового матеріалу).

На сьогодні невідомі алгоритми прямого синтезу складних технічних систем і їх розробка здійснюється в ітераційному процесі аналізу різних варіантів проектних гіпотез. Створення системи пасивного протимінного захисту ББМ у цьому відношенні не є виключенням і в загальному випадку складається з етапів, наведених на рис. 28.

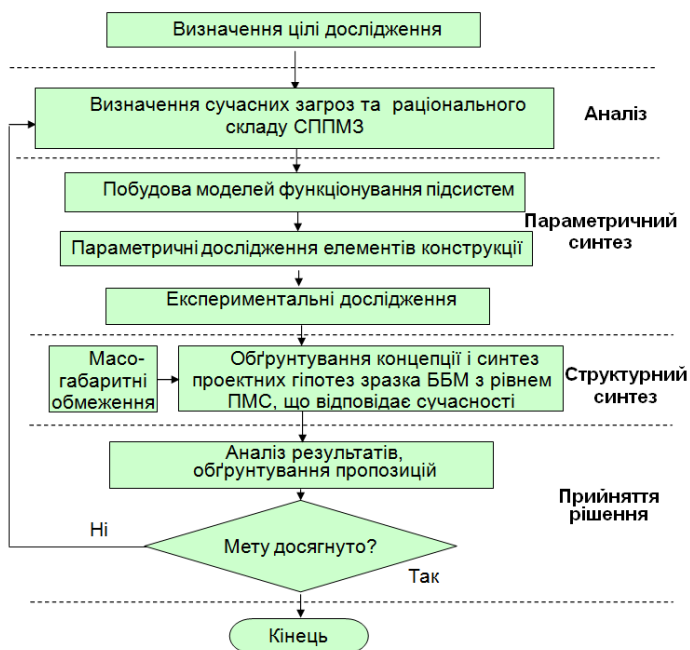


Рисунок 28. Алгоритм процесу проектування системи пасивного протимінного захисту ББМ

Разом з тим, раціональним буде поєднання чисельного моделювання та експериментальних досліджень та розбиття процесу проектування на етапи (рис. 29), що по суті доповнюють алгоритм процесу проектування системи пасивного протимінного захисту ББМ (рис. 28).

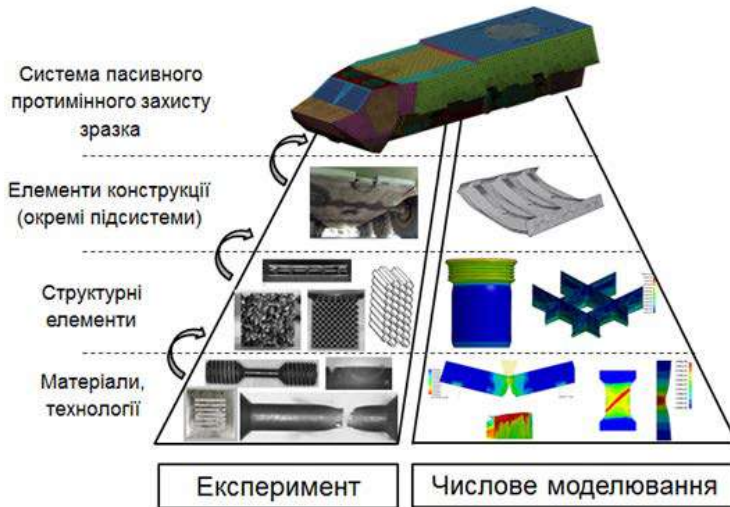


Рисунок 29. Етапи проведення досліджень

На першому етапі необхідно провести вивчення (уточнення) феномену вибух та дослідити його дію на матеріали та їх зварні з'єднання (рис. 29). Наступним кроком є дослідження структурних елементів та їх поєднання в захисні структури (окремі підсистеми). Завершальним є синтез елементів конструкції та захисних структур в єдину систему пасивного протимінного захисту. Слід відмітити, що при одноразовому проходженні цих етапів подальший синтез системи можливий з бази готових технічних рішень по структурним елементам та їх поєднанню в окремі підсистеми (захисні структури). Загальна кількість вітчизняних зразків та їх скінченно-елементні моделі представленні на рис. 30. За результатами чисельного моделювання розроблено рекомендації та пропозиції щодо вдосконалення протимінної стійкості цих зразків для забезпечення вимог тактико-технічних завдань.

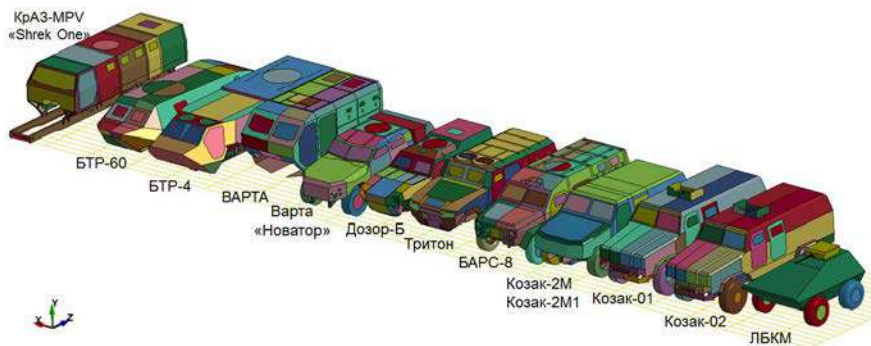


Рисунок 30. Вітчизняні зразки ББМ, для яких проведено математичне моделювання з оцінки їх протимінної стійкості

Оцінка розроблених заходів забезпечення протимінної стійкості вітчизняних зразків ББМ здійснюється шляхом натурних випробувань макетів їх бронекорпусів або повноцінної конструкції із застосуванням вимірювального комплексу, схема якого наведена на рис. 31, а загальні характеристики в таблиці 4.

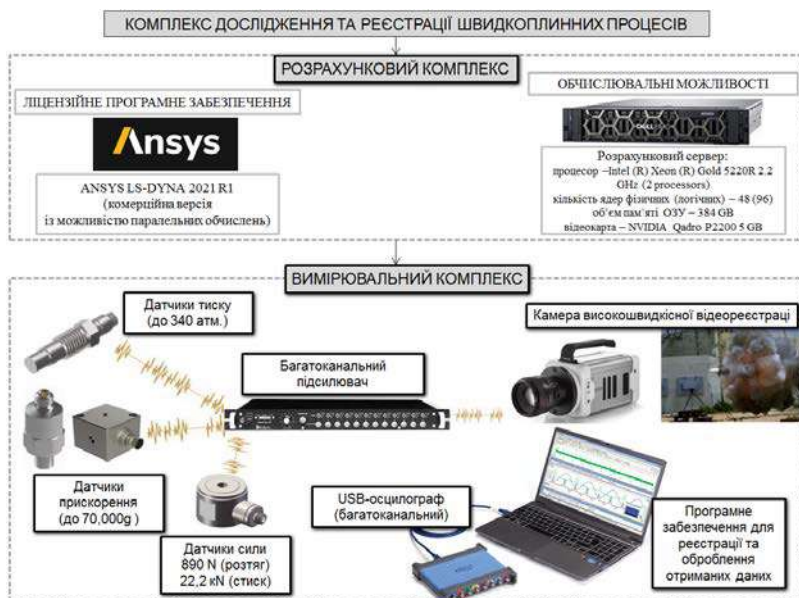


Рисунок 31. Комплекс дослідження та реєстрації швидкоплинних процесів

Таблиця 4. Загальні технічні характеристики датчиків

Модель	Гранична частота, кГц	Маса датчика, грам	Чутливість	Робоча температура, °С	Діапазон вимірювань
Датчик тиску					
2300V5	500	6,0	1 mV/psi	-73...+121	34 МПа
Одноосьовий акселерометр					
3200B	10	6,0	0,05 mV/g	-51...+121	70 000 g
3200B3	10	6,0	0,25 mV/g	-51...+121	20 000 g
3200B5	10	6,0	1 mV/g	-51...+121	5 000 g
3200B5M	10	6,0	1 mV/g	-51...+121	5 000 g
Трьохосьовий акселерометр					
7603D8	4	38,0	1,3 mV/g	-55...+125	400 g
Датчик сили					
1053V6		28	0,2 mV/N	-73...+121	890 N (розтяг) 22,2 кН (стиск)

Етапи натурних випробувань наведені на рис. 32, на прикладі спеціального броньованого автомобіля «Варта». Порівняння отриманих при чисельному моделюванні прогинів в контрольних точках конструкції та зафіксованих при натурних випробуваннях показані на рис. 33. Типові показники датчиків інформації наведені на рис. 34-35. З наведених даних можна зробити висновок про досить високу точність чисельного моделювання порівняння із натурними випробуваннями.



а



Б



В

Рисунок 32. СБА «Варта» при натурній оцінці протимінної стійкості: а – зразок на місці випробувань; б – кадри підриву; в – результати підриву

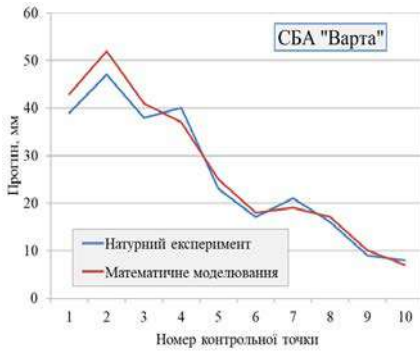


Рисунок 33. Прогини в місцях розташування ніг екіпажу та десанту СБА «Варта»:

а – підрив під колесом зразка (відносна похибка 11,1 %);

б – підрив під днищем зразка (відносна похибка 9,5 %)

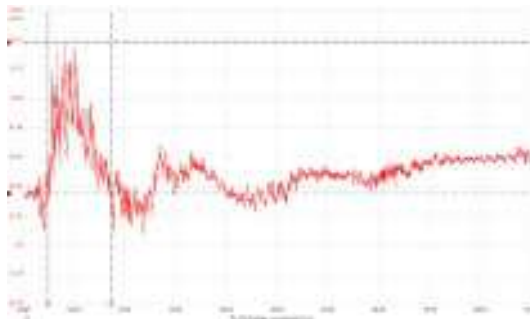


Рисунок 34. Осцилограма з датчика тиску

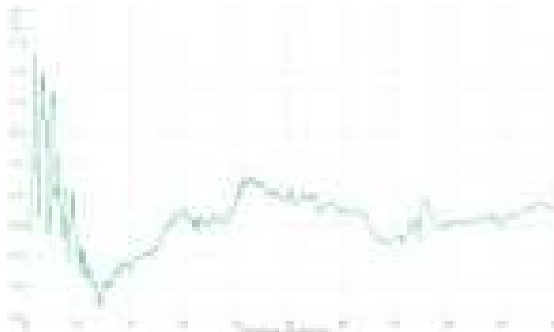


Рисунок 35. Осцилограма з датчика прискорення на місці десантника

## Балістичний захист бойових броньованих машин.

На теперішній час у багатьох країнах світу розроблено власні стандарти з висування вимог та оцінки балістичного захисту ББМ, але поряд з тим, ці країни можуть застосовувати спільні для декількох країн стандарти.

Основним зі стандартів, що характеризує досягнутий рівень балістичної стійкості ББМ, є погодження по стандартизації НАТО STANAG 4569 [30], що імплементоване як ДСТУ, вимоги якого наведені в таблиці 5. Боєприпаси, що застосовуються при випробуваннях, за цим стандартом, зображені на рис. 36.

Таблиця 5. Вимоги стандарту STANAG 4569 до балістичного захисту ББМ

Рівень	Вид зброї	Тип боєприпасів, калібр, мм	Відстань, м	Швидкість, м/с	Горизонтальний тальний кут підходу, град.	Кут піднесення, град.	Кількість необхідних пострілів
1	Гвинтівка	7,62×51 NATO Ball (куля M80)	30	833	360	0–30	22
	Гвинтівка	7,62×51 NATO SS109	30	900	360	0–30	22
	Гвинтівка	5,56×45 M193	30	937	360	0–30	22
	Гармата	20 мм FSP	100	–	360	0–18	5
2	Гвинтівка	7,62×39 API BZ	30	695	360	0–30	22
	Гармата	20 мм FSP	80	–	360	0–18	5
3	Снайперська гвинтівка	7,62×51 AP (WC core)	30	930	360	0–30	22
	Снайперська гвинтівка	7,62×54R B32 API (Dragunov)	30	854	360	0–30	22
	Гармата	20 мм FSP	60	–	360	0–30	5
4	Важкий кулемет	14,5×114 AP B32	200	911	360	0	12
	Гармата	20 мм FSP	25	960	360	0–90	5
5	Автоматична гармата	25 мм APDS-TM-791 or TLB 073	500	1258	±30	0	12
	Автоматична гармата	25×137 мм APFSDS-T PMB 090	500	1136	±30	0	12
	Гармата	20 мм FSP	25	960	360	0–90	5
6	Автоматична гармата	30×165 мм AP-T	500	810	±30	0	12
	Автоматична гармата	30×173 мм APFSDS-T	500	Не заст.	±30	0	12
	Гармата	20 мм FSP	10	1250	360	0–90	5



а



б

*Рисунок 3б. Загальний вигляд боєприпасів, що використовуються при випробуваннях (а) та стандартні осколки (б)*

На сьогодні методи дослідження складних високошвидкісних фізичних процесів суттєво розвинулися в порівнянні з минулим століттям. Це пов'язано, насамперед, зі створенням нових елементів випробувальних установок, що дають можливість більш точно отримати експериментальні дані. Проте такі експерименти вимагають використання складного обладнання та залучення значних коштів. Сучасний розвиток обчислювальної техніки в поєднанні з числовими методами дозволяє проводити дослідження швидкопротікаючих процесів, частково або повністю замінюючи проведення натурального експерименту. Крім того, застосування числового моделювання дозволяє значно скоротити фінансові витрати на проведення експериментальних досліджень. Поєднання натурних експериментів з числовим моделюванням дає змогу більш швидко та точно отримувати інформацію про поведінку захисних конструкцій.

Тому, створення чисельних моделей процесів, що досліджуються, перевірка їх адекватності, стійкості, збіжності та оцінка точності рішення є актуальним науковим завданням при дослідженні шляхів забезпечення захищеності ББМ від ураження кулями стрілецької зброї [40].

В цьому підрозділі наведено основні рівняння чисельної моделі пробиття гомогенної перешкоди ударником з різною формою головної частини та визначено похибку рішення порівняно з відомими експериментальними даними.

Апробація числової моделі проведена використовуючи результати натурального експерименту [41]. При цих дослідженнях використано три форми головної частини ударника: циліндрична, напівсферична та конічна. Вибір таких форм пояснюється можливістю дослідження різних механізмів пробиття перешкоди.

Підхід до побудови скінченно-елементної моделі та методологія ідентифікації фізико-термомеханічних властивостей матеріалів ґрунтується на даних робіт [42,43].

При проведенні натурального експерименту у якості перешкоди використовувалася жорстко закріплена кругла пластина діаметром 500 мм та товщиною 12 мм виготовлену зі сталі WELDOX 460E з характеристиками наведеними в таблиці 6 [41].

Таблиця 6. Характеристики сталі WELDOX 460E (перешкода)

E(ГПа)	$\nu$	$\rho$ (кг/м <sup>3</sup> )	A(МПа)	B(МПа)	
200	0.33	7850	490	807	
$C_p$ (л/кгК)	$\alpha$	$\bar{\alpha}$ (1/К)	$T_m$ (К)	$T_0$ (К)	
452	0.9	$1,1 \cdot 10^{-5}$	1800	293	
N	$p_0, r_0$ (1/с)	C	$D_c$	$p_d$	
0.73	$5 \cdot 10^{-4}$	0.0144	0.30	0	
M	D <sub>1</sub>	D <sub>2</sub>	D <sub>3</sub>	D <sub>4</sub>	D <sub>5</sub>
0.94	0.0705	1.732	-0.54	-0.015	0

Ударники мали форму циліндрів діаметром 20 мм та масою 0,197 кг. Інші геометричні розміри ударників підбиралися з умови незмінності їх маси (рис. 37). Ударники виготовлені зі сталі ARNE TOOL STEEL з характеристиками наведеними в таблиці 7 [41].

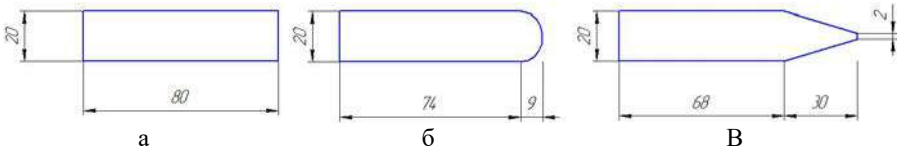


Рисунок 37. Геометричні розміри ударників з різними типами головної частини:  
 а – циліндрична; б – напівсферична; в – конічна

Таблиця 7. Константи матеріала для сталі ARNE TOOL STEEL (ударник)

Е(ГПа)	$\nu$	$\rho$ (кг/м <sup>3</sup> ) kg/ m <sup>3</sup>	$\sigma_0$ (МПа)	$E_t E_t$ (ГПа)	$\varepsilon_f$ (%)
204	0.33	7850	1900	15	2.15

Скінченно-елементна модель утворена чотирьохвузловими плоскими елементами. Для зменшення часу розрахунку розміри елементів були збільшенні ближче до закріпленої частини пластини. Для скорочення часу обчислень було використано вісесиметричну постановку задачі.

Для дослідження поведінки пластини при пробитті ударником з урахуванням залежності пластичності матеріалу від температурних змін використовувалися модель пластичності матеріалу Джонсона-Кука (JOHNSON-COOK) [1]:

$$\sigma_y = (A + B\bar{\varepsilon}^n) \cdot (1 + c \ln \dot{\varepsilon}^*) \cdot (1 - T^{*m}), \quad (2)$$

де  $A, B, C, n$  і  $m$  – константи матеріалу;  $\bar{\varepsilon}^n$  – ефективна пластична деформація;  $\dot{\varepsilon}^* = \dot{\bar{\varepsilon}}^n / \dot{\varepsilon}_0$  швидкість ефективної пластичної деформації для  $\dot{\varepsilon}_0 = 1s^{-1}$ ;  $T^* = (T - T_{room}) / (T_{melt} - T_{room})$  – гомологічна температура.

Деформація при руйнуванні задавалась залежністю:

$$\varepsilon^f = [D_1 + D_2 \exp D_3 \sigma^*] \cdot [1 + D_4 \ln \dot{\varepsilon}^*] \cdot [1 - T^*], \quad (3)$$

де  $\sigma^* = p / \sigma_{eff}$  – співвідношення тиску до ефективних напружень.

Руйнування відбувається за умови, якщо параметр руйнування  $D = \sum \bar{\varepsilon}^p / \varepsilon^f$  досягає значення 1.

Залежність тиску та об'єму пластини описувалась з використанням рівняння стану Мі-Грюнаїзена (MI-GRUNEISEN) [10]:

$$p = \left[ \frac{\rho_0 \cdot C^2 \cdot \mu [1 + (1 - \gamma_0 / 2)\mu - a / 2\mu^2]}{1 - (S_1 - 1)\mu - S_2 \frac{\mu^2}{\mu + 1} - S_3 \frac{\mu^3}{(\mu + 1)^2}} \right] + (\gamma_0 + a\mu)E, \quad (4)$$

де  $C$  – кутовий коефіцієнт кривої  $V_s - V_p$ ;  $S_1, S_2, S_3$  – коефіцієнти нахилу кривої  $V_s - V_p$ ;  $\gamma_0$  – постійна Грюнайзена;  $a$  – корекція об'єму першого порядку  $\gamma_0$ ;  $\mu = \frac{\rho}{\rho_0} - 1$ .

Оскільки основним об'єктом досліджень була саме пластина, то для скорочення часу обчислень ударник було описано використовуючи модель Купера-Саймондса.

За результатами проведеного числового моделювання отриманні значення швидкості ударників після пробиття ними перешкоди. Ці значення порівнянні зі значеннями що отриманні при натурному експерименті (рис. 38). Крім того порівняно значення швидкості пробки для циліндричної та напівсферичної головної частин ударника (рис. 39).

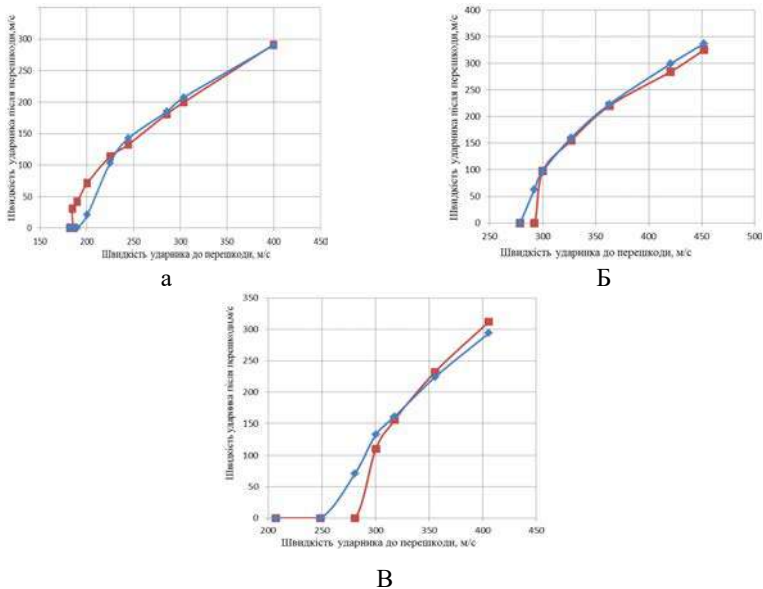
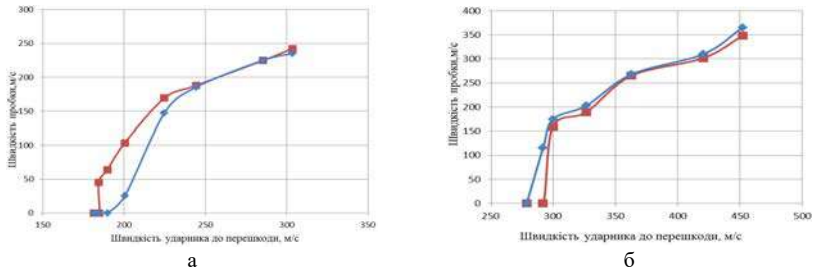


Рисунок 38. Значень швидкості ударника після пробиття перешкоди:  
■ – натурний експеримент, ◆ – числовий розрахунок, а – циліндрична форма ударника, б – напівсферична форма головної частини ударника, в – конічна форма головної частини ударника



*Рисунок 39. Значень швидкості пробки після пробиття ударником перешкоди (позначення на рис. 38)*

Отриманні значення показують, що відносна похибка числового розрахунку у порівнянні з натурними експериментами не перевищує 10 %. Отримана точність характерна для граничних режимів пробиття.

Якісне порівняння процесу пробиття ударником перешкоди при натурному експерименті та при числовому розрахунку представлено на рис. 40.

Типовий процес пробиття ударником перешкоди наведено на рис. 41-43. Типові залежності зміни швидкості ударника та пробки, що утворюється при пробитті наведено на рис. 44.

Існування значної кількості числових методів для реалізації дослідження процесу пробиття ударниками гетерогенних і гомогенних перешкод потребує оцінки їх точності та визначення меж їх застосування.

З цією метою проведено порівняння результатів числового моделювання пробиття ударником гомогенної перешкоди з використанням двомірного Лагранжевого підходу (2D) та методу Smooth Particle Hydrodynamics (3D). При застосуванні 2D підходу сердечник і перешкода задані з використанням вісесиметричних зважених по площі елементів в системі координат Лагранжа. При застосуванні 3D підходу сердечник заданий з використанням об'ємних елементів з рівномірним розподілом напружень. Перешкода задана з використанням повноінтергуємих об'ємних S/R елементів (з вибірковою пониженням порядку інтегрування). В місці взаємодії ударника з перешкодою використанні елементи SPH (Smooth Particle Hydrodynamics) (рис. 45).

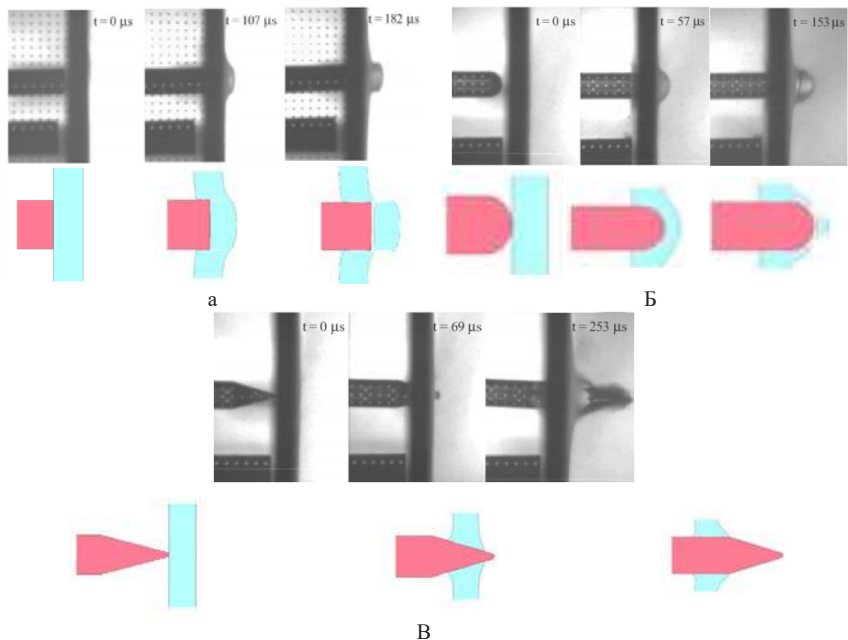


Рисунок 40. Якісне порівняння процесу пробиття ударником перешкоди:  
 а – циліндрична форма ударника, б – напівсферична форма головної частини  
 ударника, в – конічна форма головної частини ударника

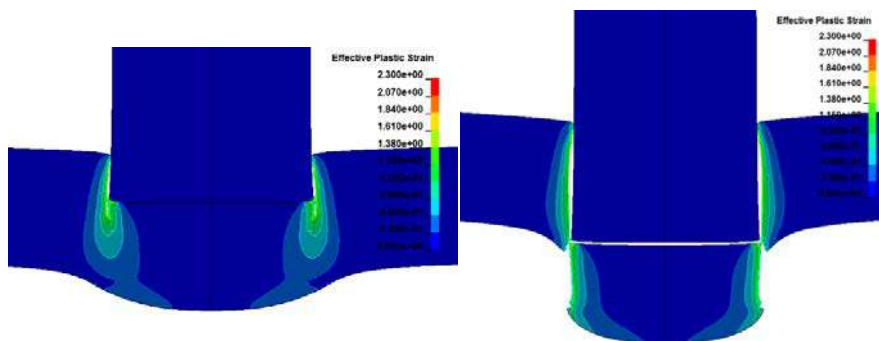


Рисунок 41. Типовий процес пробиття циліндричним ударником перешкоди та  
 поля пластичних деформацій

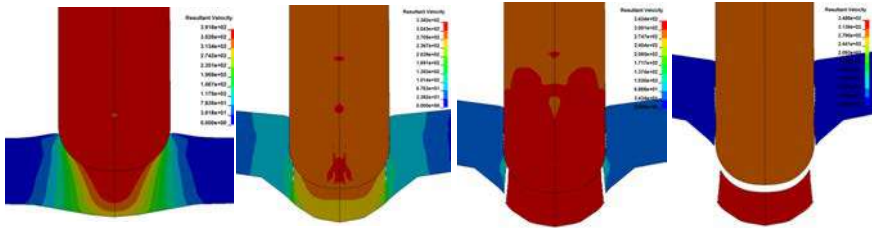


Рисунок 42. Типовий процес пробиття циліндричним ударником перешкоди та поля результуючої швидкості

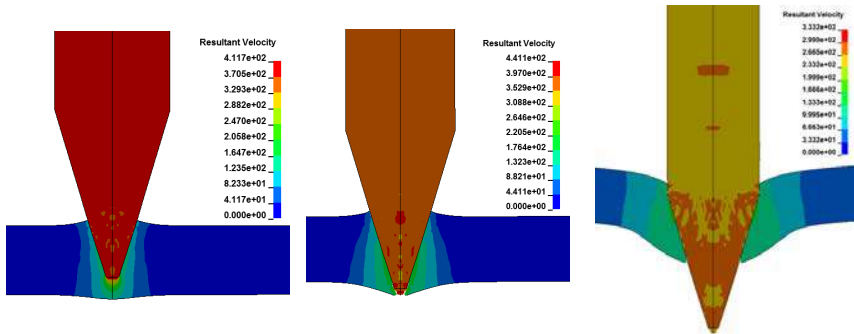


Рисунок 43. Типовий процес пробиття циліндричним ударником перешкоди та поля результуючої швидкості

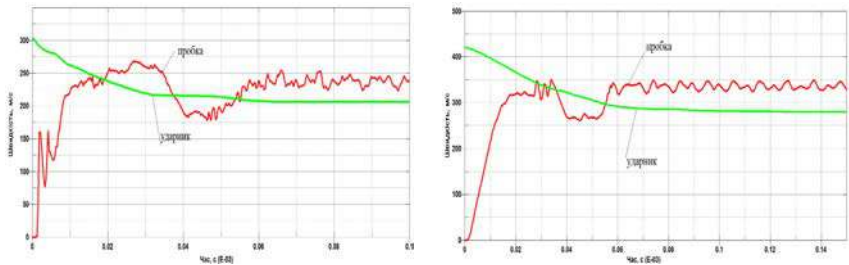


Рисунок 44. Типові залежності зміни швидкості ударника та пробки:

а – циліндрична форма ударника, б – напівсферична форма головної частини ударника

Порівняння точності вирішення процесу, що досліджувався проведено за значеннями швидкості ударника за перешкодою. За результатами проведеного

числового моделювання з використанням 3D і 2D підходів отримані значення швидкості ударника за перешкодою (таблиця 8).

Таблиця 8. Значення швидкості ударника перед перешкодою та за нею після пробиття

Тип ударника	Початкова швидкість, м/с	Швидкість за перешкодою, м/с			Відносна похибка при застосуванні методу, %	
	експеримент	експеримент	2D	SPH	2D	SPH
Плоский	303,5	199,7	206,4	194,8	3,4	2,5
	244,2	132,6	127,3	120,4	4,0	9,2
	285,4	181,1	187,4	174	3,5	3,9
	200,4	71,4	78,7	70	10,2	2,0
	181,5	0	0			
	224,7	113,7	78,7	101,7	30,8	10,6
	184,3	30,8	0	1,34	100,0	95,6
	189,6	42	0	48,5	100,0	15,5
	184,8	0	0	28,1		
Напівсферичний	399,6	291,3	298,5	296,3	2,5	1,7
	300	97,2	0	200	100,0	105,8
	278,9	0	0	167,7		
	362,9	220,2	138,6	276,3	37,1	25,5
	292,1	0	0	188,2		
	326,7	154,8	0	233,4	100,0	50,8
	452	325,1	310,6	374,6	4,5	15,2
Конічний	420,6	284,3	251,1	341,7	11,7	20,2
	317,9	155,8	0	175,2	100,0	12,5
	355,6	232,3	0	235,3	100,0	1,3
	280,9	0	0	102,6		
	300,3	110,3	0	143,7	100,0	30,3
	405,7	312	143,9	304,2	53,9	2,5

Отриманні значення похибки показують, що при наближенні до границі балістичного ліміту значення відносної похибки зростають для всіх ударників з різною формою головної частини. Однак при швидкостях ударника, що вища від балістичного ліміту в 1,2-1,5 рази значення відносної похибки не перевищують 5 %.

Застосування 3D підходу з застосуванням елементів SPH до моделювання задачі пробиття для всіх ударників з різною формою головної частини мають меншу відносну похибку порівняно із застосуванням 2D підходу. Пояснити це можливо специфікою представлення скінченного середовища в 2D підході і як наслідок до неможливості врахування деяких процесів, що відбуваються при

пробитті перешкоди (у нашому випадку наприклад утворення «пелюсткового» пробиття з чотирма симетричними пелюстками) (рис. 46). Для ударника з кінчною головною частиною (куля типу Б-32) застосування 2D підходу дає значну відносну похибку. Крім того, із зростанням швидкості ударника відносна похибка 3D підходу зменшується інтенсивніше у порівнянні з 2D підходом.

За результатами проведених досліджень можна зробити такі висновки.

1. Розроблена чисельна модель для дослідження пробиття ударниками з різною формою головної частини гомогенних перешкод. Порівняння отриманих числових значень з даними експериментальних досліджень показують, що відносна похибка вирішення задачі пробиття ударником з різними геометричними формами головної частини гомогенної перешкоди знаходиться в діапазоні 2-10 %.

2. За результатами оцінки збіжності чисельного рішення отримані значення розмірів скінченних елементів, що дозволяють отримувати адекватне рішення в діапазоні швидкості удару 180-450 м/с.

3. Розроблена числова модель може бути використана для оцінки захисних елементів в конструкції бойових броньованих машин та проведення їх параметричного синтезу за обраним критерієм ефективності.

При дослідженнях пробиття перешкоди ударниками з різною формою головної частини із застосуванням 3D та 2D підходу отриманні значення похибки показують, що при наближенні до границі балістичного ліміту значення відносної похибки зростають для всіх ударників з різною формою головної частини. Однак при швидкостях ударника, що вища від балістичного ліміту в 1,2-1,5 рази значення відносної похибки не перевищує 5 %.

Застосування 3D підходу, на основі методу SPH, до моделювання задачі пробиття для всіх ударників з різною формою головної частини дає меншу відносну похибку порівняно із застосуванням 2D підходу. Пояснити це можливо специфікою представлення скінченного середовища в 2D підході і як наслідок до неможливості врахування деяких процесів, що відбуваються при пробитті перешкоди (у нашому випадку це утворення «пелюсткового» пробиття з чотирма

симетричними пелостками). Для ударника з конічною головною частиною (куля типу Б-32) застосування 2D підходу дає значну відносну похибку. Крім того, зі зростанням швидкості ударника відносна похибка 3D підходу зменшується інтенсивніше у порівнянні з 2D підходом. Розроблена числова модель може бути використана для оцінки захисних елементів в конструкції бойових броньованих машин та проведення їх параметричного синтезу за обраним критерієм ефективності. Застосування методу SPH (3D підхід) є більш прийнятним для дослідження захисних елементів бойових броньованих машин від броньбійних засобів ураження кінетичної дії.

Як приклад застосування чисельного моделювання для дослідження балістичної стійкості захисних структур наведено результати чисельного моделювання пробиття 7,62 мм кулею Б-32 зварного зеднання броньових сталей (рис. 47).

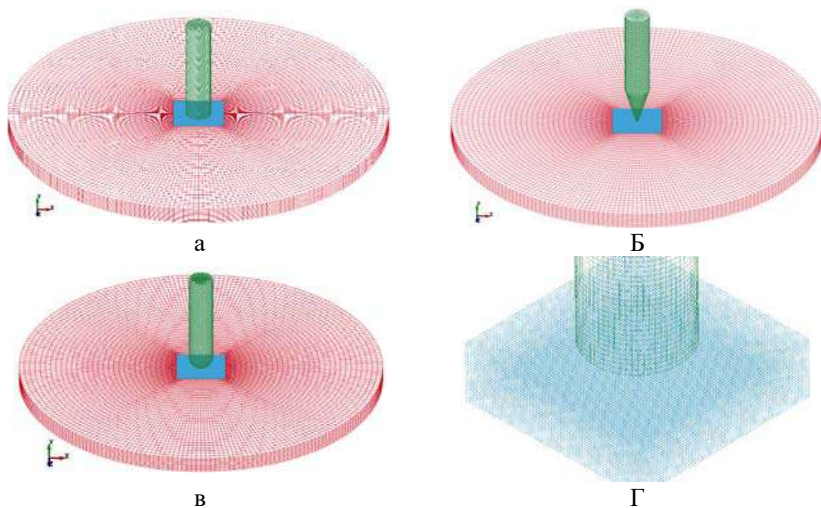


Рисунок 45. Скінченно-елементні моделі ударників з різною формою головної частини і перешкоди в 3D постановці: а – плоский, б – напівсферичний, в – конічний, г – типовий набір елементів SPH

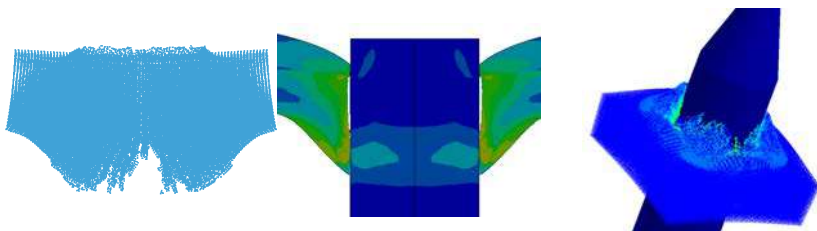


Рисунок 46. Порівняння пробиття при використанні 2D і 3D підходів за типом «пелюсткового» пробиття

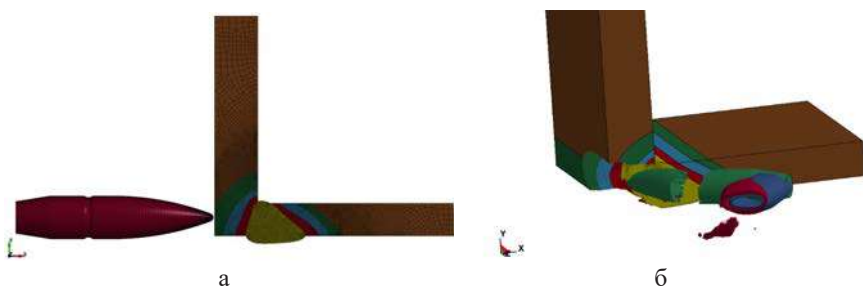


Рисунок 47. Скінченно-елементна модель взаємодії броньбійної 7,62 мм кулі Б-32 зі зварним з'єднанням броньової гомогенної перешкоди (а) та кадри моделювання влучення в край зварного з'єднання (б)

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Давидовський Л. С., Бісик С. П. Визначення напрямів підвищення захищеності бойових броньованих машин на основі аналізу бойових уражень / ЦНДІ ОВТ ЗСУ / ЦНДІ ОВТ ЗС України. Вип. 1 (68). К. : ЦНДІ ОВТ ЗС України, 2018. С. 45–54.
2. Арістархов О. М., Бісик С. П., Слюсар В. І. Оцінка вагомості показників бронетранспортера за даними опитування з використанням методу попарного порівняння // *Озброєння та військова техніка : щокв. наук.-техн. журн.* / ЦНДІ ОВТ ЗСУ. 2019. №2 (22). С. 42-49. DOI: [https://doi.org/1034169/2414-0651.2019.2\(22\).42-49](https://doi.org/1034169/2414-0651.2019.2(22).42-49)

3. Бойко Г. О. Деякі дані сучасного стану й тенденцій розвитку колісних бойових броньованих машин / С. П. Бісик, Г. О. Бойко // *Озброєння та військова техніка* : щокв. наук.-техн. журн. / ЦНДІ ОБТ ЗСУ. 2014. №3 (3). С. 20-24.

4. Броня дала тріщину: поставки українській армії бойових машин «Дозор-Б» знову зриваються. URL: <https://www.unian.ua/war/1310279-bronya-dala-trischinu-postavki-ukrajinskiy-armiji-boyovih-mashin-dozor-b-znovu-zrivayutsya-zmi-foto.html>

5. Потерять \$2,5 млрд : Кто подарил Кремлю крупнейший военный контракт Украины URL: <https://kh.depo.ua/rus/kh/irakskiy-kontrakt-hto-zgubiv-nauybilshe-viyskove-zamovlennya-ukrayini-20170904633391>

6. Литвиненко А. В., Ткачук Н. А., Литвин Б. Я., Шейко А. И. Общий подход к проектно-технологическому обеспечению защищенности бронекорпусов транспортных средств специального назначения // *Механіка та машинобудування*. – 2012. – № 2. – С. 221-229.

7. Сливінський О. А., Бісик С. П., Чернозубенко О. В. Здатність до зварювання та службові характеристики броньових сталей іноземного виробництва // Проблеми координації військово-технічної та оборонно-промислової політики в Україні. Перспективи розвитку озброєння та військової техніки: IV Міжн. Наук.-прак. конф., 12-13 жовт. 2016 р.: тези доповідей. – К. – 2016. – С. 167-169.

8. Позняков В. Д., Костин В. А., Гайворонский А. А., Моссоковская И. А. и др. Влияние термического цикла сварки на структурно-фазовые превращения и свойства металла ЗТВ среднеуглеродистой легированной стали типа 30X2H2MФ // *Автомат. сварка*. – 2015. – №2. – С. 8-15.

9. Сливінський О. А., Бісик С. П. Фазовий склад та механічні властивості металу навколошовної ділянки зварних з'єднань броньових сталей закордонного виробництва // Інноваційні технології та інжиніринг в зварюванні і споріднених процесах «PolyWeld-2016» : Міжн. конф., 26-27 травня 2016 : збірн. доп. – К. – 2016. – С. 154-158.

10. Структура та властивості зварних з'єднань броньових сталей закордонного виробництва / О. А. Сливінський, С. П. Бісик, О. В. Чернозубенко // *Технологические системы*. – 2016. – №3 (76). – С. 103-112.

11. Сливінський О. А., Коваленко В. Л. Перепічай А. О. Вплив зварювального тепла на знеміцнення металу зони термічного впливу броньової сталі // *Перспективи розвитку озброєння та військової техніки Сухопутних військ* : Міжн. наук.-техн. конф., 11-12 трав. 2017 р.: 3б. тез доп. – Львів : НАСВ. – 2017. – С. 59-60.

12. Сливінський О. А., Тонкушіна К. Д. Вплив легувальних елементів на фазовий склад та механічні властивості зони термічного впливу броньової сталі НВ500Mod // *Зварювання та споріднені процеси і технології* : Х Всеукр. міжгалузева наук.-техн. конф., 8-9 черв. 2017 р.: тези доповідей. – К. – 2017. – С. 35-36.

13. Підхід до оцінки протимінної стійкості корпусів бойових броньованих машин з урахуванням зварних з'єднань // *Наука і техніка Повітряних Сил ЗС України* / ХНУПС ім. Кожедуба. Вип. 3(28). Х. : ХНУПС ім. Кожедуба, 2017. С. 121-127.

14. Бісик С. П., Чернозубенко О. В., Схабицький В. Р., Сливінський О. А., Ханюков В. А. Числове моделювання пробиття гомогенної перешкоди ударниками з різною формою головної частини // *Озброєння та військова техніка* : *щокв. наук.-техн. журн.* / ЦНДІ ОВТ ЗСУ. 2017. №2 (14). С. 17-22.

15. Бісик С. П., Чернозубенко О. В., Сливінський О. А., Схабицький В. Р., Корбач В. Г. Порівняння ефективності підходів до числового моделювання пробиття ударником гомогенної перешкоди // *Озброєння та військова техніка* : *щокв. наук.-техн. журн.* / ЦНДІ ОВТ ЗСУ. 2017. №3 (15). С. 17-22.

16. Сливінський О. А., Ковтонюк М. М., Бісик С. П. Неоднорідності зварних з'єднань броньових сталей високої твердості // *Проблеми координації воєнно-технічної та оборонно-промислової політики в Україні. Перспективи розвитку озброєння та військової техніки*: V Міжн. Наук.-прак. конф., 10-13 жовт. 2017 р.: тези доповідей. – К. – 2017. – С. 192-194.

17. MIL-DTL-46100E «ARMOR PLATE, STEEL, WROUGHT, HIGH-HARDNESS».

18. Быков А. Н., Мельник А. Д., Проворная А. Е. Исследование сварного шва броневой стали БТ-70Ш // *Вестник бронетанковой техники*. – 1981. – №1. – С. 47-49.

19. Quenched and Tempered Steels, Australian Welding Research Association, 1985, Techn. Note 15, Milsons Point.

20. BAE Systems Completes First Production ACV, Will Display It At Modern Day Marine. URL: <https://news.usni.org/2016/09/21/bae-systems-completes-first-production-acv-will-display-modern-day-marine>

21. Patria – trusted provider of armored wheeled vehicles and mortar systems. URL: <https://www.kemppi.com/ru/otzyvy/patria/>

22. Про недавнее интервью с первым заместителем гендиректора госконцерна «Укроборонпром». URL: <https://andrei-bt.livejournal.com/385822.html>

23. Bending ARMOX & CNC bending. URL: <http://www.armoueng.com/en/bending.php>

24. Григорян В. А. и др. Защита танков : монография. /Москва : Изд-во им. Н. Э. Баумана, 2007. 327 с.

25. Радковець Ю. І. та ін. Основні типи мін, їх тактико-технічні характеристики та застосування в збройних (локальних) конфліктах. Київ : Головне управління розвідки, 2001. 106 с.

26. Противотанковые мины. URL: <http://www.saper.etel.ru> (дата звернення 14.09.2018).

27. Селиванов В. В., Кобылкин И. Ф., Новиков С. А. Взрывные технологии : учебник для ВТУЗов / под общ. ред. В. В. Селиванова. Москва : изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2008. 648 с.

28. Хилмес Р. Защита боевых машин сухопутных войск от мин. Возможности и границы. URL: <http://btvt.narod.ru/4/mines.htm> (дата звернення 21.03.2018).

29. Бісик С. П. Аналіз протитанкових мін Російської Федерації методами кластерного аналізу // *Озброєння та військова техніка : щокв. наук.-техн. журн.* / ЦНДІ ОБТ ЗСУ. 2018. №2 (18). С. 15-22. DOI: [https://doi.org/10.34169/2414-0651.2018.2\(18\).15-22](https://doi.org/10.34169/2414-0651.2018.2(18).15-22)
30. STANAG 4569 edition 1, "Protection levels for occupants of logistic and light armored vehicles", NSA/0533-LAND/4569.
31. Hazell P.J. *Armour. Materials, Theory and Design*. Canberra, Australia : CRC Press, Taylor & Francis Group, 2016, 380 p.
32. Бісик С. П., Давидовський Л. С., Схабицький В. Р. Критерії травмування організму людини при ударному та вибуховому навантаженнях // *Системи озброєння і військова техніка: науковий журнал* // ХНУПС ім. І. Кожедуба. Вип. 1(41). X. : ХНУПС ім. Івана Кожедуба, 2015. С. 153-159.
33. Бурлаченко Н. И., Жартовский Г. С. *Виброударные воздействия на экипажи танков и БМП : научная литература*. Москва : ЦНИИ информации, 1981. 200 с.
34. Ultrastrong Mine Protection URL: <http://www.ibd-deisenroth-engineering.de/amap-m.html>.
35. Developmental tendency of landmine protection in vehicle. URL: <http://www.kms.polsl.pl/seminar2009/art/11.pdf>.
36. Protection of vehicles against mines. URL: <http://www.kones.eu/ep/2011/vol18/no1/69.pdf>.
37. Numerical analysis of a lightarmoured vehicular personnel carrier loaded with a mine or IED explosion on a human transported in it. URL: <https://dspace.lib.cranfield.ac.uk/bitstream/1826/1209/1/darina%20fiserova.pdf>
38. Бісик С. П. Аналіз пріоритетних напрямів вдосконалення протимінного захисту бойових броньованих машин. Збірник наукових праць ЦНДІ ОБТ ЗС України. 2011. № 19 (41). С. 77–81.
39. Некоторые пути повышения прочности и жесткости днищ танков URL: [http://gurkhan.blogspot.com/2011/11/64\\_01.html](http://gurkhan.blogspot.com/2011/11/64_01.html) (дата звернення: 17.05.2018).

40. Щодо підвищення захисту бойових броньованих машин від ураження 12,7 мм кулями Б-32 / А. Л. Майстренко, В. І. Куш, В. Г. Кулич О. В. Нешпор, С. П. Бісик / *Озброєння та військова техніка. Щоквартальний науково-технічний журнал*. – К. : ЦНДІ ОБТ ЗСУ, 2017-№1 (13). – С. 18-23.

41. T. Borvik. Perforation of 12mm thick steel plates by 20mm diameter projectiles with flat, hemispherical and conical noses. Part I: Experimental study / T. Borvik, M. Langseth, O. S. Hopperstad, K. A. Malo // *International Journal of Impact Engineering*. – №27 (2002) 19-35.

42. Моделирование процессов резания методом конечных элементов : методологические основы : монография / Д. В. Криворучко, В. А. Залога; под общей редакцией В. А. Залого. – Сумы : Университетская книга, 2012.-496 с.

43. Основи 3D-модельовання процесів механічної обробки методом скінченних елементів / Д. В. Криворучко, В. О. Залога, В. Г. Корбач. – Суми : Видавництво СумДУ, 2010. – 209 с.

44. Hollquist J.O. LS-DYNA Theory manual./ March 2006

# ПОКРАЩЕННЯ ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ КРАЇНИ ЗА РАХУНОК ВИКОРИСТАННЯ НИЗЬКОКАЛОРІЙНИХ ГАЗОВИХ ПАЛИВ У ДВИГУНАХ ВНУТРІШНЬОГО ЗГОРЯННЯ

*Марченко А. П., Кравченко С. С.*

## **Вступ**

### **Проблеми екологічної безпеки України**

У сучасних умовах суспільного розвитку серед пріоритетів національних інтересів України особливо виділяється забезпечення екологічно та техногенно безпечних умов життєдіяльності громадян і суспільства, збереження і відновлення навколишнього природного середовища [1].

Найбільшу шкоду навколишньому середовищу спричиняють транспорт, промисловість, енергетика та сільське господарство. Тому питання про впровадження природозберігаючих технологій у цих сферах життєдіяльності стоїть особливо гостро.

Транспорт належить до головних забруднювачів атмосферного повітря. Двигуни внутрішнього згорання транспортних засобів споживають найбільш значну долю нафтопродуктів і одночасно є активним, постійно діючим чинником хімічного, механічного, теплового і інших видів шкідливої дії на навколишнє середовище. Так, з відпрацьованими газами двигунів внутрішнього згорання викидається більш ніж 200 хімічних сполук-продуктів згорання палива, з яких найбільш небезпечними для людини є: оксиди азоту  $\text{NO}_x$ , монооксид вуглецю  $\text{CO}$ , незгорілі вуглеводні  $\text{CH}$ .

Одночасно все більшою проблемою для України стає утилізація відходів промислового виробництва, оскільки, велика кількість паливного потенціалу у вигляді низькокалорійних газів, в Україні викидається і забруднює атмосферу. Як приклад, Україна займає 4-е місце в світі по викидам шахтного газу в атмосферу. Шахтний газ значною мірою складається із метану  $\text{CH}_4$ , який за своїм негативним впливом на навколишнє середовище значно перевищує  $\text{CO}_2$ .

Не менш небезпечним забруднювачем оточуючого середовища є відходи сільськогосподарського виробництва.

Щорічно на полігони України вивозяться 11-13 млн. т. твердих побутових відходів, в процесі анаеробної переробки яких виділяється біогаз, макрокомпонентами якого є метан і діоксид вуглецю. За оцінками фахівців це приблизно 800 тис. т. метану [2].

Всі вище зазначені чинники глибоко впливають на екологічну ситуацію в Україні і викликають такі негативні наслідки як парниковий ефект, кислотні дощі, руйнування озонового шару. Утилізація означених побічних продуктів промислового та сільськогосподарського виробництва, так званих низькокалорійних газів, дозволить не тільки покращити екологічну ситуацію, але і виробляти електроенергію та тепло, частково замінюючи корисні копалини.

Як показує світовий досвід, одним із шляхів вирішення зазначених проблем, є використання означених низькокалорійних газових палив в стаціонарних енергоустановках з двигунами внутрішнього згорання. Більш того, використання деяких з цих палив навіть в якості добавки до нафтового покращує його екологічні показники, що видно з рис. 1.

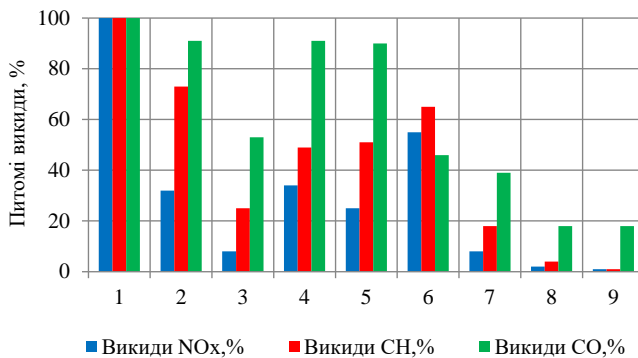


Рисунок 1. Порівняльна оцінка впливу альтернативних видів палива на екологічні показники автомобільного двигуна з примусовим займанням [4]:

- 1 – бензин; 2 – бензин + продукти його конверсії; 3 – бензин +  $H_2$ ;  
 4 – зріджений нафтовий газ; 5 – стиснутий природний газ; 6 – метанол; 7 – метанол +  $H_2$ ; 8 – синтез-газ; 9 – водень

## Низькокалорійні газові палива (НГП)

Нетрадиційні джерела енергії, до яких відносять гази вторинної переробки (синтез-газ, генераторний, піролізний, біогаз) та гази, що отримані як побічний продукт промисловості (коковий, доменний, шахтний, нафтовий гази), так звані низькокалорійні газові палива, можуть бути ефективно використані в якості альтернативних палив для когенераційних установок на базі двигунів внутрішнього згоряння. Ці палива можна виробляти з різноманітних видів як органічної, так і неорганічної сировини, таких як вугілля, нафта, природний газ, торф, деревина, побутові та промислові відходи тощо. Тому роль використання НГП швидко зростає в Європі та по всьому світу. Так, наприклад, в багатьох європейських країнах на таких газах більше 10 років виробляється електро- та тепла енергія, а програми по утилізації НГП є широко розповсюдженими [5]. Можливість спалювання широкого складу газів в ДВЗ дозволяє виробляти дешево енергію із відновлювальних, а також з побічних енергоресурсів.

На практиці більша частина газових палив складається із сумішей декількох газів в різних концентраціях в залежності від виду вихідної сировини та способу її переробки. Розглянемо основні особливості НГП.

**Синтез-газ і генераторний газ** у промисловості отримують паровою конверсією або парціальним окисленням метану, газифікацією або піролізом твердого палива (вугілля, коксу, торфу, деревини).

Співвідношення компонентів у генераторному газі, що отримано за методом газифікації, коливається в широкому діапазоні, оскільки залежить як від застосовуваної сировини, так і від виду конверсії – водяною парою або киснем. Найбільше поширення отримали методи газифікації Lurgi та Shell (рис. 2, а), за якими виходить газ складу: відповідно, 15-18 % та 65-66 % CO, 38-40 % та 30-32 % H<sub>2</sub>, 9-11 % та 0,4 % CH<sub>4</sub>, 30-32 % та 1-2 % CO<sub>2</sub>. При підвищенні температури зростає вміст оксиду вуглецю, при підвищенні тиску – водню і метану. При цьому присутні домішки інертних газів (N<sub>2</sub> й ін.) та сірководню, якщо сировина містить сірковмісні продукти. Генераторний газ очищують від сірководню та діоксиду вуглецю за допомогою селективних розчинників. Співвідношення між

CO та H<sub>2</sub> за необхідності змінюють конверсією оксиду вуглецю водяною парою з отриманням синтез-газу [6].

Заводи з газифікації працюють в 29 країнах. Лідуючі позиції в світі – 37 % виробленої потужності – займає азійсько-австралійський регіон завдяки інтенсивному розвитку цієї галузі в Китаї (рис. 2, б). Друге місце посідає африкансько-середньосхідний регіон, де Південно-Африканська республіка традиційно виробляє у великих обсягах синтез-газ для виробництва моторних палив. Найбільші заплановані обсяги будівництва потужностей з виробництва синтез-газу (65 %) має Північно-Американський регіон завдяки активній політиці США у цьому напрямку.

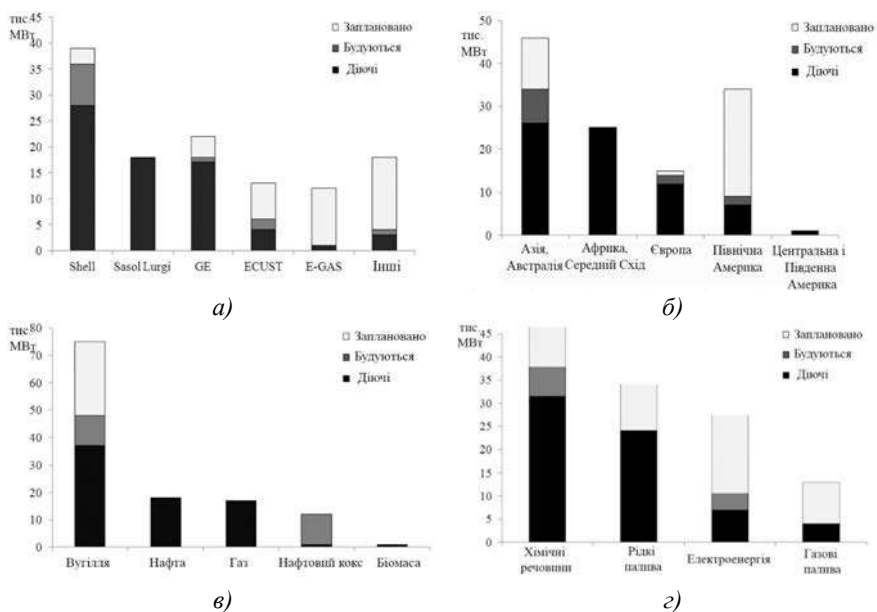


Рисунок 2. Сучасний стан виробництва синтез-газу в світі [7]:

- а – розподіл технологій газифікації вугілля в світі; б – розподіл потужностей виробництва синтез-газу по регіонах в світі; в – розподіл сировини, що використовується для виробництва синтез-газу в світі;
- г – розподіл ринкових продуктів, які виробляють з синтез-газу в світі

Більшу частину синтез-газу (51 %) виробляють з вугілля. На другому місці за використанням для виробництва синтез-газу (25 %) є нафта, на третьому (22 %) – природний газ. В якості сировини також використовують нафтовий кокс, біомасу та відходи (рис. 2, в). Більшість заводів, що будуються або заплановано побудувати працюватимуть на вугіллі [7].

Ринкові продукти, що виробляють з синтез-газу, включають хімічні речовини (45 %), рідкі моторні палива (38 %), електроенергію (11 %) та газові палива (6 %) – рис. 2, г.

Більшу частину моторних палив, що вироблено у світі з синтез-газу, отримано на 97 установках фірми Sasol у Південно-Африканській Республіці. Останнім часом потужності з виробництва синтетичних моторних палив нарощують також США і Китай.

У нетрадиційній енергетиці особливе місце займає переробка біомаси (органічних сільськогосподарських і побутових відходів) метановим бродінням з отриманням **біогазу**, макрокомпонентами якого є 40-70 % метану ( $\text{CH}_4$ ) та 30-60 % діоксиду вуглецю ( $\text{CO}_2$ ). У значно менших концентраціях, на рівні одного відсотку присутні: азот ( $\text{N}_2$ ), кисень ( $\text{O}_2$ ), водень ( $\text{H}_2$ ). Теплота згоряння біогазу зазвичай не перевищує 20-22 МДж/м<sup>3</sup>, метанове число – 110-130.

Необхідні умови для отримання біогазу – відсутність кисню та постійна температура (15-55 °С). Період ферментації становить 10-120 днів. У даний час найбільш поширена технологія «анаеробна ферментація», що протікає при температурі близько 35°C протягом 25-30 днів.

Перевага біогазу полягає в тому, що він може бути виготовлений з місцевої сировини в будь-якому місті або селищі та є відновлювальним джерелом енергії. Кожна тонна побутових відходів виділяє 120-200 м<sup>3</sup> біогазу. Кожного року на полігони України вивозять 11-13 млн т. твердих побутових відходів, в процесі переробки яких виділяється близько 800 тис. т. метану [8]. Як відомо, вплив метану на механізм утворення парникового ефекту в 21-23 разів більший за вуглекислий газ. Тому переробка біомаси та утилізація біогазу в двигунах внутрішнього згоряння з подальшим отриманням електричної та теплової енергії

дозволить покращити економічну та екологічну ситуацію в країні. Приклад цього – Німеччина, яка є провідною країною в Європі з виробництва та використання біогазу. У 2011 році в Німеччині близько 18 млрд кВт·год електроенергії генеруються з біогазу, та в середньому, більш ніж 5 мільйонів будинків забезпечується електроенергією з біогазу [9]. В липні 2012 р. у Німеччині працювало 87 установок, на яких вироблялось 55930 м<sup>3</sup>/год біометану, при цьому в процесі будівництва знаходилося ще 39 установок, що передбачає збільшення виготовлення біометану до 81620 м<sup>3</sup>/год [10].

Незважаючи на це, сьогодні сектор біоенергетики в Україні розвивається досить повільно. Україна споживає енергії із біомаси (відходів в об'ємі 1,56 млн т. н.е) лише 1,24 % від загальної поставки первинної енергії. Основним енергоносієм в Україні залишається природний газ (36,9 %), на другому місці – вугілля (32,7 %) на третьому – атомна енергія (18,7 %) [11].

Слід відзначити, що деревина не підходить для вироблення біогазу, оскільки лігнін, яка міститься в ній не переробляється метановою бактерією. Відходи деревної промисловості цілком можливо використовувати для отримання **піролізних газів**.

Піролізний газ складається з газоподібних вуглеводнів і оксиду вуглецю (CO), який утворюється від неповного згоряння деревного вугілля – твердої горючої складової деревини. Горючими елементами піролізного газу є: водень (H<sub>2</sub> – 20-40 %), оксид вуглецю (CO – 34-40 %), метан (CH<sub>4</sub> – 1-6 %). Негорючими елементами є: азот (N<sub>2</sub> – 2-5 %), вуглекислий газ (CO<sub>2</sub> – 20-35 %). Теплотворна здатність даного паливного газу становить 4-10 МДж/м<sup>3</sup>.

Технологія отримання піролізного газу включає: подрібнення відходів, їх ущільнення, відкачку повітря, дегазацію при температурі більше 600 °C та подальшу газифікацію за допомогою чистого кисню.

Газові електростанції на базі ДВЗ, що використовують піролізний газ працюють на заводах в Fondotoce (Італія), Chiba та Mutsu (Японія), Gussing, (Австрія) (рис. 3).

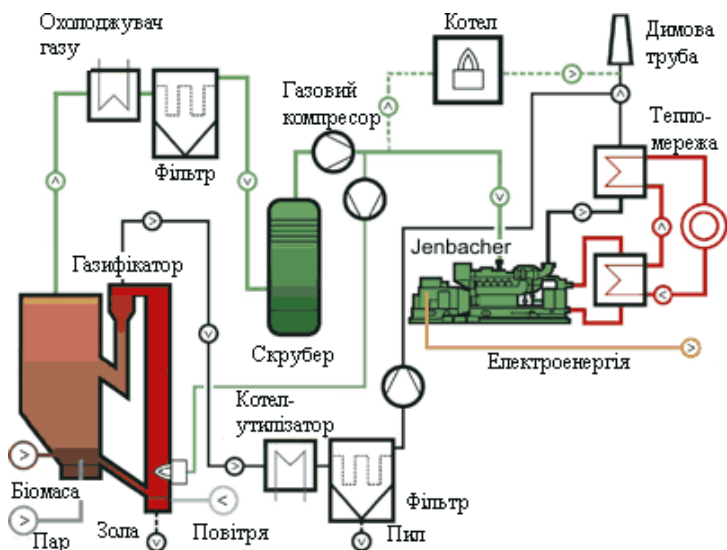


Рисунок 3. Технологія газифікації деревини в Gussing, Австрія [5]

**Коксовий газ** отримують як побічний продукт процесу виробництва коксу. Склад коксового газу значно змінюється залежно від виду вугілля, що використовується в процесі. Основними компонентами газу є водень ( $H_2 \approx 55\%$ ), метан ( $CH_4 \approx 25\%$ ) та азот ( $N_2 \approx 10\%$ ), що показано в табл. 1.

Так, наприклад, у металургійних галузях за існуючої технології виплавлення сталі на кожному технологічному процесі виділяються низькокалорійні гази, які можуть бути використані в якості палива для ДВЗ. На рис. 4 показані основні технологічні процеси та кількість газів, що виділилося на кожному етапі при виплавленні 1-ї тони сталі. Як побічний продукт при виробництві коксу утворюється коксовий газ з високим вмістом водню. На заводі середньої потужності видобувається близько 60 тисяч тон сталі на рік [12].

Сучасні металургійні підприємства розвинених країн використовують технологічні гази (доменний, коксовий, мартенівський гази та феррогаз) для вироблення електроенергії високоефективними установками на базі двигунів внутрішнього згоряння. Це дозволяє металургійним комбінатам повністю покривати власні потреби і, більше того, продавати надлишкову електроенергію.

Так, наприклад, на заводі по виробництву коксу Profusa SA в Bilbao (Іспанія) з 1995 року на коксовому газі працюють 12 двигунів GE Jenbacher, які виробляють 7164 кВт електричної потужності. При цьому рівень викидів оксидів азоту  $\text{NO}_x$  при роботі на коксовому газі забезпечується нижче на 40 % ніж при роботі на природному газі [5].

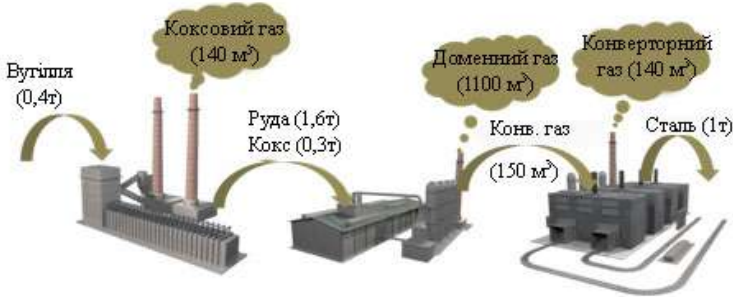


Рисунок 4. Виділення промислових газів при виплавці 1 тони сталі [12]

Перспективним альтернативним паливом на сьогодні є **шахтний газ**, що представляє собою суміш метану з повітрям. Світові запаси шахтного газу перевищують запаси природного газу та оцінюються в 260 трлн  $\text{m}^3$  [13]. Найбільш значні ресурси шахтного газу зосереджені в Росії (близько 80 трлн  $\text{m}^3$ ), США (60 трлн  $\text{m}^3$ ), Китаї (28 трлн  $\text{m}^3$ ), Україні (близько 12 трлн  $\text{m}^3$ ).

Суміш шахтного газу з повітрям при певних співвідношеннях є вибухонебезпечною. Тому, для забезпечення безпечної роботи в шахтах підтримують нижню межу метану в суміші не більше 5 %, а верхню – не менше 32 %. Разом з тим, досвід світового двигунобудування свідчить про розробку і використання в газових двигунах метано-повітряної суміші з вмістом метану, що подається в основну камеру згоряння, не менше 27 % [14].

Крім вибухонебезпечності метан є одним з газів, що створюють парниковий ефект. Вміст метану в атмосфері швидко зростає, щороку збільшуючись на 0,6 % (при збільшенні обсягу діоксиду вуглецю на 0,4 %) [15].

Велика кількість викидів метану в атмосферу відбувається саме при видобутку кам'яного вугілля. При цьому, Україна займає четверте місце у світі по викидах шахтного газу в атмосферу (рис. 5) [16]. За оцінками експертів, шахтний метан активно виділяється на 70-80 % діючих шахт України.

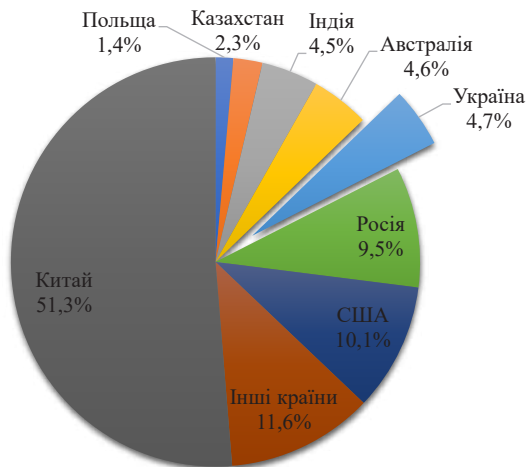


Рисунок 5. Викиди шахтного метану на вугільних шахтах світу [16]

Утилізація шахтного метану є надзвичайно актуальним для України з точки зору економіки розглядаючи його як ресурс для забезпечення енергетичних потреб країни, та з екологічних міркувань зменшення викидів метану в атмосферу. Крім того, відбір шахтного газу є одним з важливих факторів створення безпечних умов роботи на шахтах України.

Таким чином, велика кількість різноманітних газів (відходів промислового і сільськогосподарського виробництва) в Україні викидаються у навколишнє середовище та забруднюють атмосферу. Утилізація цих газів дозволить поліпшити екологічну ситуацію в країні, а також зменшити її енергозалежність від імпорту природного газу. Накопичений досвід експлуатації газових двигунів зарубіжних компаній показує, що широкий спектр низькокалорійних газів можливо ефективно використовувати в газових двигунах. Проте різноманітність

НГП, а отже широкий діапазон їх фізико-хімічних властивостей ускладнює регулювання й оптимізацію робочих процесів в двигуні порівняно з використанням традиційних палив. У зв'язку з цим велика увага приділяється дослідженням, що направлені на оцінку придатності до використання того чи іншого палива (оцінку фізико-хімічних властивостей), та вивченню факторів, які впливають на показники двигунів.

### **Вплив компонентного складу НГП на їх моторні властивості**

Склад низькокалорійних газових палив широко змінюється залежно від вихідної сировини (вугілля, індустріальні гази та побутові відходи) способу та технології виробництва (газифікації або окислення), конфігурації та умов експлуатації хімічного реактора або очисників. Фізико-хімічні властивості таких газів надзвичайно різноманітні, проте тільки ті гази, характеристики яких знаходяться в певному діапазоні, можуть використовуватися в газових двигунах. В табл. 1 наведені фізико-хімічні властивості деяких НГП. Видно, що горючими компонентами низькокалорійних газових палив є водень  $H_2$ , оксид вуглецю  $CO$ , метан  $CH_4$  і незначна кількість важких вуглеводнів. Решта (близько 10-50 % від загального об'єму) – негорючі компоненти, зокрема азот  $N_2$ , діоксид вуглецю  $CO_2$  та кисень  $O_2$ . Саме компонентний склад газового палива визначає його моторні властивості.

Нижча теплота згоряння НГП змінюється в широких межах – 3,5-27 МДж/м<sup>3</sup>, що в 1,5-10 разів менше теплоти згоряння природного газу (35,9 МДж/м<sup>3</sup>). Так, наприклад, синтез-газ та генераторний газ мають, відповідно, в 3,4 та 5,8 разів меншу об'ємну нижчу теплоту згоряння у порівнянні з природним газом. Це пояснюється значним вмістом в НГП водню, що має низьку об'ємну теплоту згоряння (характерно для синтез-газу), або великим вмістом інертних компонентів (генераторний газ). Нижча теплота згоряння визначає об'ємну витрату палива двигуном. Очевидно, що для забезпечення незмінної потужності двигуна у порівнянні з роботою на природному газі потрібно збільшувати об'ємну циклову подачу НГП.

Важливою моторною властивістю газового палива є метанове число, що визначає можливість роботи двигуна за високих ступенів стиску. Згідно табл. 1 шахтний газ, біогаз та генераторний газ мають порівняно високі значення метанового числа (135-70). Проте коксовий газ та синтез-газ мають низькі МЧ (30-60), що пояснюється високим вмістом водню. Гази, які мають змінне або низьке МЧ схильні до детонації, що призводить до виникнення ударних механічних та теплових навантажень на деталі двигуна.

Таблиця 1. Властивості газових палив та їх компонентів [5,17]

Газ	Компонентний склад, % об.	Нижча теплота згоряння МДж/м <sup>3</sup>	Межі займання		Ламінарна швидкість згоряння, см/с	Необхідна кількість повітря м <sup>3</sup> /м <sup>3</sup>	Метанове число *	С/Н	Густина, кг/м <sup>3</sup>
			Нижня	Верхня					
Метан	CH <sub>4</sub>	35,0	2	0,6	41	9,55	100	3	0,716
Водень	H <sub>2</sub>	10,8	10	0,15	270	2,38	0	0	0,0899
Монооксид вуглецю	CO	12,6	2,94	0,15	45	2,38	73	-	1,25
Природний газ	CH <sub>4</sub> =92,2 C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> =4,1 C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> =1,0 C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> =0,36 C <sub>5</sub> H <sub>12</sub> =0,33 N <sub>2</sub> =2 CO <sub>2</sub> =0,1	34,2	2,0	0,6	40-42	9,96	79,8	3,1	0,781
Синтез-газ (Тексако)	H <sub>2</sub> =35 CO=52 CH <sub>4</sub> =0,4 N <sub>2</sub> =0,6 CO <sub>2</sub> =12	10,48	5,63	0,2	70	2,11	56,1	10,48	0,928
Піролізний газ	H <sub>2</sub> =30 CO=35 CH <sub>4</sub> =5 N <sub>2</sub> =5 CO <sub>2</sub> =25	9,4	5,0	0,37	70	2,03	78	9,7	1,054
Шахтний газ	CH <sub>4</sub> =43,8 N <sub>2</sub> =43,2 CO <sub>2</sub> =2,2 O <sub>2</sub> =9,8	15,47	2,0	0,7	37	3,74	108	3,17	1,037
Біогаз	CH <sub>4</sub> =65 CO <sub>2</sub> =35	22,75	1,9	0,62	27	6,2	135	4,61	1,15
Коксовий газ	H <sub>2</sub> =55 CO=8 CH <sub>4</sub> =31 N <sub>2</sub> =3,8 CO <sub>2</sub> =1,2 O <sub>2</sub> =1	17,8	4,43	0,4	100	4,42	40,5	2,056	0,46
Генераторний газ	H <sub>2</sub> =23 CH <sub>4</sub> =2 N <sub>2</sub> =42 CO <sub>2</sub> =9 CO=24	6,2	2,17	0,6	50	1,31	70,7	7,73	1,037

\* – розраховано за методикою AVL.

На процес згоряння в двигуні з примусовим запалюванням значно впливає наявність інертних компонентів (зокрема  $\text{CO}_2$  та  $\text{N}_2$ ), що входять до складу НГП. На рис. 6 показано залежності, що характеризують вплив різних інертних компонентів на метанове число та межі запалювання.

Ці компоненти не беруть активної участі в процесі згоряння, проте збільшують МЧ газового палива (рис. 6, а). При цьому вплив вмісту  $\text{CO}_2$  на МЧ

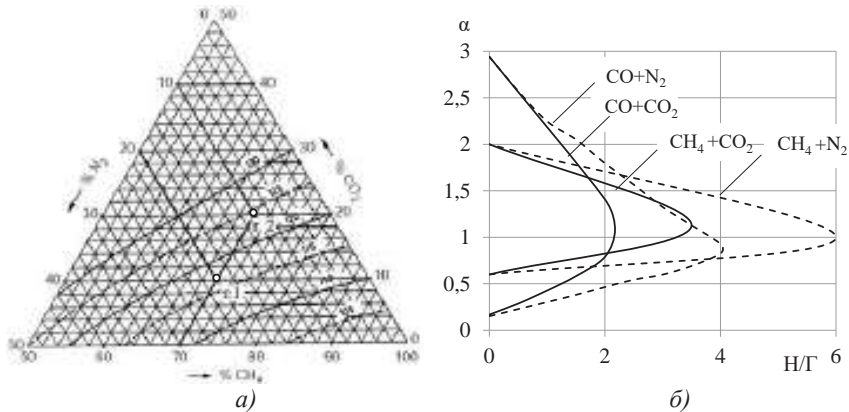


Рисунок 6. Вплив вмісту інертних компонентів на метанове число (а) [19] та межі запалювання паливо-повітряної суміші, (б) Н/Г – відношення негорючих та горючих компонентів

в 3 рази вище, ніж вплив  $\text{N}_2$  [18]. Наприклад, для газу, що містить 10 %  $\text{CO}_2$ , 20 %  $\text{N}_2$ , 70 %  $\text{CH}_4$  (точка 1, рис. 6, а) метанове число дорівнює 117, а для газу 20 %  $\text{CO}_2$ , 10 %  $\text{N}_2$ , 70 %  $\text{CH}_4$  (точка 2, рис. 6, а) метанове число – 124.

Інертний компонент  $\text{CO}_2$  на відміну від інших інертних складових НГП є трьохкомпонентним газом, що має порівняно високу теплоємність. Наприклад, теплоємність  $\text{CO}_2$  за температурою  $1500^\circ\text{C}$  складає  $44,035 \text{ кДж}/(\text{кмоль}^\circ\text{C})$ , що в 1,8 разів більше теплоємності  $\text{N}_2$  за цієї температури. Підвищений вміст  $\text{CO}_2$  в НГП може привести до зменшення максимального тиску і температури циклу, отже зниження термодинамічної ефективності циклу.

Значення меж запалювання визначають можливість ефективного збіднення або збагачення паливо-повітряної суміші: верхня межа відповідає

максимальному збагаченню суміші, нижня – максимальному збідненню. З рис. 5, б видно, що підвищення вмісту інертних компонентів в паливі призводить до звуження меж запалювання. При цьому вплив інертного компоненту  $\text{CO}_2$  на межі запалювання є більш суттєвим у порівнянні з  $\text{N}_2$ .

$\text{H}_2$  та  $\text{CO}$  відрізняються більш широкими концентраційними межами (відповідно,  $\alpha=0,15-10$  та  $\alpha=0,15-2,95$ ), а наявність цих компонентів розширює межі запалювання НГП. Згідно табл. 1, синтез-газ, піролізний, коксовий та генераторний газу мають більш широкі межі запалювання ніж інші НГП. Розширення меж запалювання НГП сприяє покращенню запуску ДВЗ за низьких температур, підвищує надійність запалювання і повноту згорання збіднених паливо-повітряних сумішей.

Ламінарна швидкість згорання палива обумовлює ступінь підвищення тиску в циліндрі та жорсткість робочого процесу двигуна. Ця властивість залежить як від складу палива, так і ступеня збіднення газоповітряної суміші. Зі збільшенням швидкості згорання ростуть навантаження на деталі кривошипно-шатунного механізму. Крім того, збільшується максимальна температура робочого тіла, що призводить до зростання викидів оксидів азоту  $\text{NO}_x$ . Проте зі зменшенням швидкості згорання зростає неповнота згорання палива і погіршується паливна економічність двигуна. Наявність водню  $\text{H}_2$  в паливі призводить до суттєвого збільшення швидкості згорання і, як наслідок, зменшення неповноти згорання НГП. З табл. 1 видно, що для шахтного газу та біогазу швидкість згорання є меншою порівняно з природним газом, а для генераторного, піролізного та коксового газу – більшою. Можна передбачити, що відповідну тенденцію зміни матиме і повнота згорання для означених палив.

Зі збільшенням відношення  $\text{C}/\text{H}$ , тобто зі збільшенням вмісту вуглецю в паливі, паливо-повітряні суміші згоряють при більш високих температурах (за однакових умов згорання). Це пояснюється тим, що для повного згорання одиниці маси вуглецю необхідна в 3 рази менша кількість повітря, ніж для згорання водню. Теплота згорання палива виділяється в меншому об'ємі газу, що призводить до збільшення температури. Очевидно найбільші температури

матимуть місце при згорянні синтез-газу, генераторного та піролізного газів, найменші – шахтного, біогазу та коксового газів.

Очевидно, що найкращими моторними властивостями володіють НГП, що мають високі значення метанового числа та об'ємної теплоти згорання, низький вміст інертних компонентів та відношення С/Н, широкі межі запалювання та високу швидкість згорання. Проте підвищення вмісту окремих компонентів у складі НГП (зокрема  $\text{CH}_4$  та  $\text{H}_2$ ) неоднозначно впливає на моторні властивості палива, що призводить як до покращення одних моторних властивостей, так і погіршення інших. Наприклад,  $\text{H}_2$  має високу швидкість згорання, що з однієї сторони, поліпшує умови згорання палива в двигуні та підвищує його ефективність, з іншої – внаслідок підвищення температури циклу призводить до збільшення емісії  $\text{NO}_x$  з ВГ. Присутність  $\text{CO}$  та  $\text{CH}_4$  в суміші зменшує швидкість згорання.  $\text{CO}_2$  та  $\text{N}_2$  діють як розчинник, зменшуючи швидкість та температуру полум'я, проте підвищують МЧ газового палива. Оцінити комплексний вплив властивостей НГП на показники двигунів можливо експериментальним шляхом або за результатами математичного моделювання їх робочих процесів.

### **Аналіз проблем використання НГП в ДВЗ**

На сьогодні на світовому ринку представлені двигуни фірм Caterpillar, Waukesha Engine Dresser Inc, GE Energy Jenbacher gas engines, Cummins Power Generation, MWM GmbH (в минулому Deutz Power Systems) та ін. [5,20-23], які працюють на різних НГП у складі когенераційних установок.

Основними проблемами використання НГП в якості палива для ДВЗ є низька теплотворна здатність, присутність компонентів, що негативно впливають на процеси згорання та терміни експлуатації двигунів, нестабільність компонентного складу [26]. Занадто низькі значення нижчої теплоти згорання та метанового числа взагалі унеможливають використання деяких видів НГП у двигуні. Означені проблеми в ряді випадків можуть бути усунені адаптацією конструкції двигуна до використання певного виду палива, зокрема зміною

ступеня стиску, корекцією кута випередження запалювання, збільшення енергії запалювання, тощо [20, 24-27].

Використання НГП в традиційних двигунах з іскровим запалюванням, які працюють на стехіометричній або збагаченій паливо-повітряній суміші може призвести до погіршення якості запалювання та пропусків спалахування, зниження потужності й ККД двигуна [25,28-30]. Це пояснюється зниженням нижчої теплоти згоряння палива та зменшенням швидкості розповсюдження фронту полум'я з підвищенням вмісту інертних компонентів, особливо  $\text{CO}_2$ . Як наслідок, збільшується тривалість згоряння та період затримки запалювання. Результати дослідження [31] показують, що при роботі двигуна з іскровим запалюванням на збідненій до  $\alpha=1,05$  паливо-повітряній суміші добавка  $\text{CO}_2$  до палива в кількості 20-40 % не призводить до зниження потужності, а при роботі на збагаченій до  $\alpha=0,98$  паливо-повітряній суміші природного газу та 30 %  $\text{CO}_2$  внаслідок збільшення неповноти згоряння палива спостерігається зниження потужності на 3%, індикаторного ККД – на 2 %.

При використанні НГП в двигунах великої розмірності також виникає проблема забезпечення надійного запалювання та згоряння суміші. Цю проблему вирішують за допомогою використання форкамерно-факельного запалювання, за якого висока енергія форкамерного факелу стабілізує процес згоряння в циліндрі [20,27]. Зокрема, фірмою Caterpillar розроблено двигун з іскровим запалюванням низькокалорійних палив за допомогою системи форкамерно-факельного запалювання [20,32]. При цьому до форкамери та циліндру двигуна газ подається з однієї паливної магістралі. В роботі [33] показано, що форкамерно-факельне запалювання збіднених сумішей біогазу ( $\text{CH}_4=60\%$ ;  $\text{CO}_2=40\%$ ) з повітрям дозволяє забезпечити надійну роботу двигуна. При цьому ефективний ККД двигуна знижується на 1 % у порівнянні з його роботою на природному газі, а викиди з ВГ  $\text{CO}$  та  $\text{CH}$  зменшуються відповідно на 15 та 8 %, емісія  $\text{NO}_x$  залишається незмінною. Відзначено, що процес згоряння збіднених сумішей НГП з повітрям майже не відрізняється від згоряння природного газу та несуттєво залежить від вмісту інертних компонентів  $\text{N}_2$  та  $\text{CO}_2$  в паливі.

Компенсувати зниження ККД двигуна вдається за рахунок оптимізації його конструктивних та регулювальних параметрів, зокрема, ступеня стиску, кута випередження запалювання, тиску наддуву, енергії запалювання та ін.

Таким чином, використання НГП в ДВЗ на теперішній час для транспортних енергетичних установок є обмеженим, що обумовлюється проблемами зберігання цих палив на борту транспортних засобів, зменшення потужності двигуна, зменшенню запасу ходу транспортного засобу, складністю організації точного дозування двох палив при використанні НГП в якості добавки до основного. Найбільш перспективним слід вважати безпосереднє використання НГП у стаціонарних установках з ДВЗ з форкамерно-факельним запалюванням збіднених паливо-повітряних сумішей для вироблення електроенергії, які можуть бути розташовані поблизу сировини цього палива.

### **Проблеми та перспективи конвертації вітчизняних газових двигунів ГД100 для роботи на низькокалорійних газових паливах**

Аналіз конструкцій і показників роботи сучасних стаціонарних газових двигунів, що виробляють та експлуатують в Україні показав, що найбільш високі показники паливної економічності мають газові двигуни типу ГД100. Це вертикальний двигун, десятициліндровий, двотактний, із зустрічно рухомими поршнями і прямоточною продувкою. Розташування циліндрів однорядне.

Експлуатація підтвердила значні переваги означених двигунів відносно зносостійкості, довговічності, терміну служби, відносно низької вартості технічного обслуговування [34-38]. Більш того, ці двигуни мають нетрадиційну систему запалювання – форкамерно-факельне запалювання (ФФЗ) паливо-повітряної суміші, що дає можливість конвертувати їх для роботи на НГП. Тому ці двигуни вибрані в якості базових для конвертації на НГП. Основні параметри двигуна 11ГД100М наведені нижче [36].

Кількість циліндрів $Z$ .....	10
Діаметр циліндра $D$ , м.....	0,207
Хід нижнього і верхнього поршнів $S_1=S_2$ , м.....	0,254

Ступінь стиску $\epsilon$ .....	12,5
Кут початку запалювання, відносно нижнього КВ $\theta$ , гр.п.к.в.....	358
Кут відставання верхнього колінчастого вала від нижнього $\phi_{\text{отст}}$ , гр.....	12
Номінальна потужність $N_e$ , кВт.....	1078
Максимальна потужність протягом однієї години $N_{e,max}$ , кВт .....	1185
Номінальна частота обертання колінчастого валу $n$ , хв <sup>-1</sup> .....	750
Середній ефективний тиск на номінальному режимі $p_e$ , МПа.....	0,532
Максимальний тиск згоряння $p_z$ , МПа.....	не більше 7,5
Тиск наддувного повітря на режимах номінальної потужності $p_s$ , МПа..	0,2-0,27
Питома витрата палива (природного газу) на номінальному режимі $g_e$ , кДж/(кВт год).....	не більше 10400

Особливістю системи форкамерно-факельного запалювання є можливість здійснення стабільного робочого процесу на збіднених і вкрай збіднених паливо-повітряних сумішах. Завдяки цьому в двигунах ГД100 вдається здійснити якісне регулювання потужності від повного навантаження до холостого ходу, за якої коефіцієнт надлишку повітря в циліндрі змінюється в межах  $\alpha = 1,7-3$ .

Як відомо, для метану нижня межа іскрового запалювання в суміші з повітрям  $\alpha = 1,6-2,0$  [39-41]. Проте межі стійкої, рівномірної роботи двигунів ГД100 є значно ширшими ( $\alpha=3$ ), що пояснюється властивостями і особливостями поширення форкамерного факела. На відміну від звичайного іскрового запалювання форкамерний факел має значно більшу енергію та швидкість поширення, що сприяє викненню в циліндрі великої кількості джерел займання.

Разом з тим, при форкамерно-факельному запалюванні в двигунах ГД100 спостерігається різке зменшення індикаторного ККД при  $\alpha > 2-2,5$  внаслідок зростання неповноти згоряння. За цих умов відбувається зниження температури в циліндрі на початку згоряння та різке зниження температури при розширенні робочого тіла під впливом руху поршнів. В результаті температура згоряння знижується настільки, що більше половини заряду згоряє в умовах повільного протікання хімічних реакцій, частина палива, яка не встигла згоріти при розширенні, викидається з ВГ [34]. Одним із способів підвищення ефективності

згоряння збіднених паливо-повітряних сумішей є підвищення температури заряду суміші на впуску [34,42,43].

При роботі двигунів на НГП виникає ряд інших проблем (зниження потужності й ККД двигуна, погіршення якості запалювання та ін.), що вимагає суттєвої модернізації конструкції двигуна та його систем.

При використанні НГП в форкамері може утворитися значно збіднена паливо-повітряна суміш, оскільки для повного згоряння одиниці НГП потрібно менша кількість повітря у порівнянні з природним газом (табл. 1). За таких умов можливі пропуски запалювання в циліндрі двигуна, оскільки в даному випадку збільшується мінімально потрібна енергія запалювання суміші від розряду свічки запалювання та зменшується енергія факелу на виході. З іншої сторони, займання збагачених сумішей утворює потужний факел, що може призвести до небажаного збільшення тиску згоряння, жорсткої роботи двигуна, перегріву стінки циліндру напроти сопла форкамери та виникнення детонаційного згоряння. Отже при зміні виду газового палива потрібно змінювати конструкцію форкамери і налаштування газової апаратури.

Таким чином, означена модернізація неможлива без проведення розрахункових і експериментальних досліджень впливу конструктивних і регульовальних параметрів двигуна на його показники, виконання оптимізації параметрів з метою покращення технікоекономічних показників двигунів типу ГД100.

### **Дослідження процесу згоряння НГП в циліндрі двигуна 11ГД100М**

З використанням розробленої математичної моделі [44] проведено розрахункове дослідження робочого процесу стаціонарного газового двигуна 11ГД100М при використанні в якості палива низькокалорійних газів (табл. 1). На рис. 7 наведені розрахункові індикаторні діаграми, температури РТ в процесі згоряння та характеристики тепловиділення на номінальному режимі роботи двигуна 11ГД100М при використанні природного газу та НГП.

З рис. 7, а видно, що при використанні синтез-газу, генераторного газу та піролізного газу в циліндрі двигуна зменшується період затримки запалювання та збільшується швидкість згоряння в початковий період згоряння та, як наслідок, збільшується на 4,7 – 9 % максимальний тиск циклу. Пояснюється це наявністю в цих паливах значної кількості водню, що має високу швидкість згоряння і низьку теплоємність. Крім того, наявність великої кількості водню в цих НГП призводить до розширення меж запалювання і згоряння, а отже і збільшення на 4,2-4,6 % повноти згоряння, що видно з характеристик активного тепловиділення (рис. 7, а).

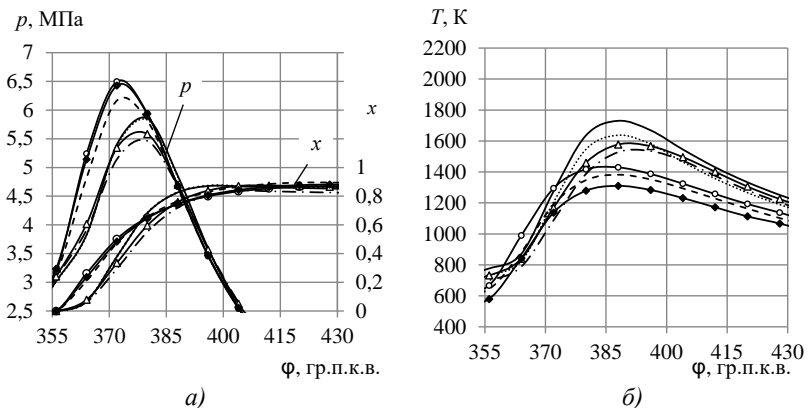


Рисунок 7. Розрахункові індикаторні діаграми, характеристики тепловиділення (а) та температура РТ в циліндрі двигуна 11ГД100М (б) в процесі згоряння при використанні природного газу та НГП ( $n = 750 \text{ хв}^{-1}$ ;  $N_e = 1100 \text{ кВт}$ ;  $p_s = 0,127 \text{ МПа}$ ;  $\theta_{zn} = 8 \text{ гр. п.к.в.}$ ;  $\epsilon = 12,5$ ): — – Природний газ;  $\circ$  – Синтез-газ; - - - - Піролізний газ; - . - - Шахтний газ; ..... – Біогаз;  $\Delta$  – Коксовий газ;  $\blacklozenge$  – Генераторний газ

При використанні шахтного газу в якості палива зменшується на 0,5 МПа максимальний тиск циклу порівняно з роботою на природному газі. Також спостерігається зменшення швидкості згоряння та погіршення динаміки тепловиділення.

Процес згоряння біогазу в циліндрі двигуна 11ГД100М протікає без суттєвих змін у робочому циклі. При цьому, тиск згоряння і температура РТ майже не змінюються.

Проаналізуємо процес згоряння НГП в циліндрі двигуна 11ГД100М при значеннях надлишку повітря, за яких працює дослідний двигун на номінальному режимі роботи при використанні в якості палива природного газу ( $\alpha=1,92$ ). Вказане досягається зменшенням тиску наддувочного повітря  $p_s$  при незмінній цикловій подачі палива.

На рис. 8 наведені розрахункові індикаторні діаграми, температура РТ у процесі згоряння та характеристики тепловиділення двигуна 11ГД100М при роботі на НГП за однакових коефіцієнтів надлишку повітря  $\alpha$ .

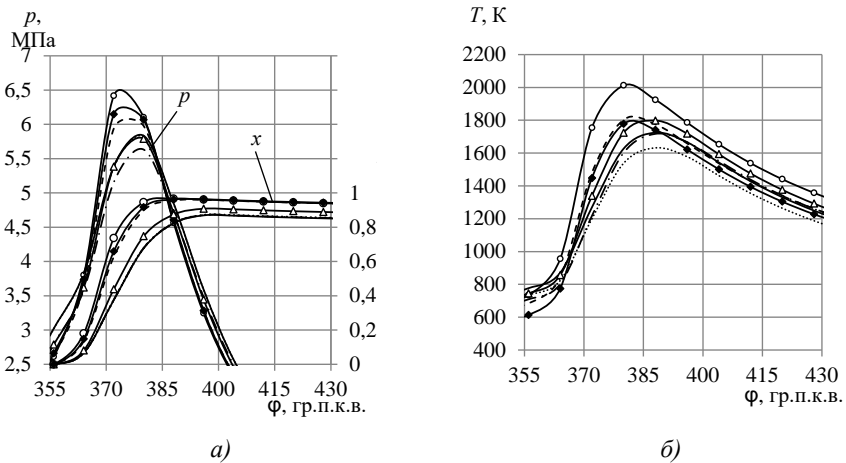


Рисунок 8. Розрахункові індикаторні діаграми, характеристики тепловиділення (а) та температура РТ в циліндрі двигуна 11ГД100М (б) в процесі згоряння за  $\alpha=1,92$ : — — — Природний газ;  $\circ$  — Синтез-газ; - - - - Піролізний газ; - . - - Шахтний газ; ..... — Біогаз;  $\Delta$  — Коксовий газ;  $\blacklozenge$  — Генераторний газ

Аналіз приведених характеристик активного тепловиділення (рис. 7 та 8) показує, що при збагаченні паливо-повітряної суміші до  $\alpha=1,92$  на ділянці видимого згоряння виділяється більше на 15 % активної теплоти (відповідно

близько 80 % та 95 %). У всіх випадках максимальний тиск згоряння залишається майже незмінним, проте помітно зростає температура згоряння (рис. 8, б). Означене сприяє більш повному згорянню палива та підвищенню термодинамічної ефективності робочого циклу.

Порівнюючи температури РТ в процесі згоряння за однакових  $\alpha$  при використанні в якості палива біогазу спостерігається зниження температури циклу на 93 К у порівнянні з роботою двигуна на природному газі. Пояснюється це зменшенням швидкості згоряння біогазу та наявності великого вмісту  $\text{CO}_2$ , що має високу теплоємність яка збільшується зі збільшенням температури. Це означає, що при високій температурі згоряння багато теплоти поглинається  $\text{CO}_2$ , і таким чином значно знижується температура полум'я. Зниження температури циклу при використанні в якості палива біогазу у порівнянні з природним газом спостерігається і в роботах [45,46].

Таким чином, характер кривих тиску залежить від вмісту  $\text{CH}_4$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{CO}$ , інертних газів та коефіцієнту надлишку повітря. Високий вміст водню в синтез-газі, піролізному газі, коксовому газі та генераторному газі призводить до швидкого згоряння, а пік на кривих тиску зміщується ближче до ВМТ. Наявність вмісту  $\text{CO}_2$  в паливі призводить до зменшення температури згоряння. Покращити показники двигуна 11ГД100М при роботі на НГП можливо за рахунок регулювання складу паливо-повітряної суміші.

### **Показники двигуна на номінальному режимі**

Результати розрахунку робочого процесу двигуна 11ГД100М, що працює на НГП та природному газі, на номінальному режимі роботи наведені на рис. 9.

Видно, що коефіцієнт надлишку повітря при використанні низькокалорійних газів (окрім біогазу) значно зростає порівняно з роботою на природному газі. Проте показники ефективності робочого циклу (індикаторний та ефективний ККД) майже не змінюються, що пояснюється розширенням меж запалювання і згоряння паливо-повітряної суміші. Отримані розрахункові

результати підтверджуються даними експериментальних випробовування на ДП «Завод ім. Малишева».

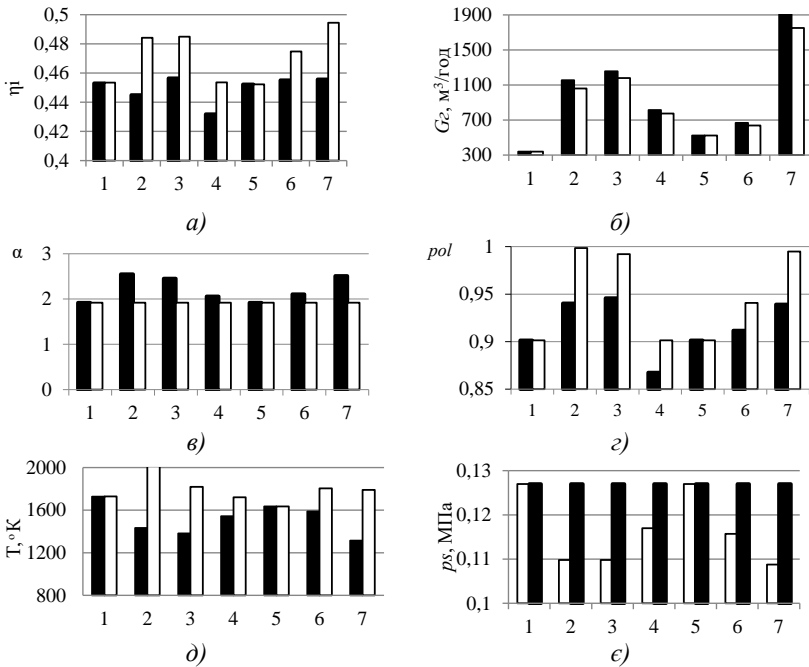


Рисунок 9. Показники двигуна 11ГД100М на номінальному режимі ( $N_e = 1100 \text{ кВт}$ ,  $p_s = 0,127 \text{ МПа}$ ) при використанні природного газу та НГП:

■ –  $p_s = 0,127 \text{ МПа}$ ; □ –  $p_s = \text{var}$ ; а – індикаторний ККД; б – об’ємна витрата палива; в – коефіцієнт надлишку повітря; г – повнота згоряння палива; д – максимальна температура циклу; е – тиск наддуву; 1 – Природний газ; 2 – Синтез-газ; 3 – Піролізний газ; 4 – Шахтний газ; 5 – Біогаз; 6 – Коксовий газ; 7 – Генераторний газ

Винятком є використання шахтного газу, для якого індикаторний і ефективний ККД двигуна зменшуються на 4,6 %. Це паливо, що складається в основному з метану і повітря, має такі самі властивості як і природний газ.

Отже збільшення надлишку повітря призводить до зменшення швидкості і повноти згоряння шахтного газу в циліндрі ДВЗ. При роботі двигуна на біогазі індикаторний ККД, тиск згоряння і коефіцієнт надлишку повітря майже не змінюються.

Крім того, при роботі двигуна 1ГД100М на збіднених до  $\alpha=1,92$  паливо-повітряних сумішах спостерігається підвищення індикаторних показників двигуна. Це обумовлено збільшенням швидкості згоряння та температури циклу (рис. 9, д) та, як наслідок, збільшенням індикаторного ККД двигуна та повноти згоряння палива. Так, наприклад, при використанні синтез-газу, генераторного та піролізного газів зменшення  $\alpha$  призводить до підвищення індикаторного ККД з 0,43-0,45 до 0,45-0,49 та максимальної температури циклу на 30-40 %, повнота згоряння при цьому наближається до одиниці. При цьому індикаторний ККД двигуна перевищує відповідний показник при роботі двигуна на природному газі. Проте, слід відзначити, що тиск наддуву при цьому дорівнює  $p_s=0,109-0,11$  МПа, що може призвести до погіршення очищення циліндру від ВГ.

Наслідком підвищення індикаторного ККД двигуна при збагаченні паливо-повітряної суміші є покращення його паливної економічності. З рис. 9 видно, що об'ємна витрата палива зменшується на 5-8 % залежно від виду НГП.

Збагачення паливо-повітряної суміші від  $\alpha=2,06$  до  $\alpha=1,92$  при використанні шахтного газу також призводить до збільшення індикаторного ККД, який наближується до відповідного показника при роботі на природному газі. При цьому тиск наддуву зменшується до  $p_s=0,117$  МПа.

Слід відмітити суттєве збільшення об'ємної витрати палива при використанні НГП, внаслідок зменшення їх теплотвірної здатності. Так, найбільше зростання об'ємної витрати палива (в 5,6 разів) спостерігається при використанні генераторного газу, найменше зростання – у випадку використання біогазу (в 1,5 разів), коксового газу (в 1,95 разів), шахтного газу (в 2,4 разів).

За результатами проведеного розрахункового дослідження можна зробити висновок, що при використанні НГП відбувається значне збіднення паливо-повітряної суміші в циліндрі двигуна ГД100 у порівнянні з роботою на

природному газі. Недивлячись на це, показники ефективності робочого циклу (індикаторний та ефективний ККД) майже не змінюються, що пояснюється розширенням меж запалювання і згоряння паливо-повітряної суміші. Виключенням є використання шахтного газу, для якого індикаторний і ефективний ККД двигуна зменшується на 4,6 %.

Результати дослідження показують, що регулювання складом паливо-повітряної суміші є ефективним заходом підвищення ефективності робочого процесу двигуна 11ГД100М при його роботі на НГП.

### **Показники двигуна на режимах навантажувальної характеристики**

На рис. 10 представлено основні параметри роботи газового двигуна 11ГД100М при роботі на низькокалорійних газових паливах та природному газі за навантажувальною характеристикою при  $n = 750 \text{ хв}^{-1}$ ,  $p_s = 0,127 \text{ МПа}$ ,  $\theta = 358$  гр.п.к.в.

З рис. 10 видно, що індикаторний та ефективний ККД двигуна при використанні НГП (окрім біогазу та коксового газу) на режимах часткових навантажень зменшуються порівняно з роботою на природному газі. Слід відзначити збільшення повноти згоряння синтез-газу, піролізного та генераторного газів палива на всіх режимах роботи двигуна, що призводить до збільшення максимального тиску згоряння на 0,8-2 МПа. Проте, не дивлячись на це, на режимах малих та середніх навантажень індикаторний та ефективний ККД двигуна зменшуються у порівнянні з роботою двигуна на природному газі. Так, наприклад, на режимі 25 %  $N_e$  індикаторний ККД двигуна при використанні синтез-газу, генераторного та піролізного газів зменшується, відповідно, на 19,3 %, 16,3 % та 14,2 %. Зниження ефективності циклу при використанні означених палив можна пояснити значним зростанням коефіцієнту надлишку повітря в циліндрі (до  $\alpha = 2,85$ ), зменшенням температури циклу і, як наслідок, зменшенням індикаторного ККД двигуна.

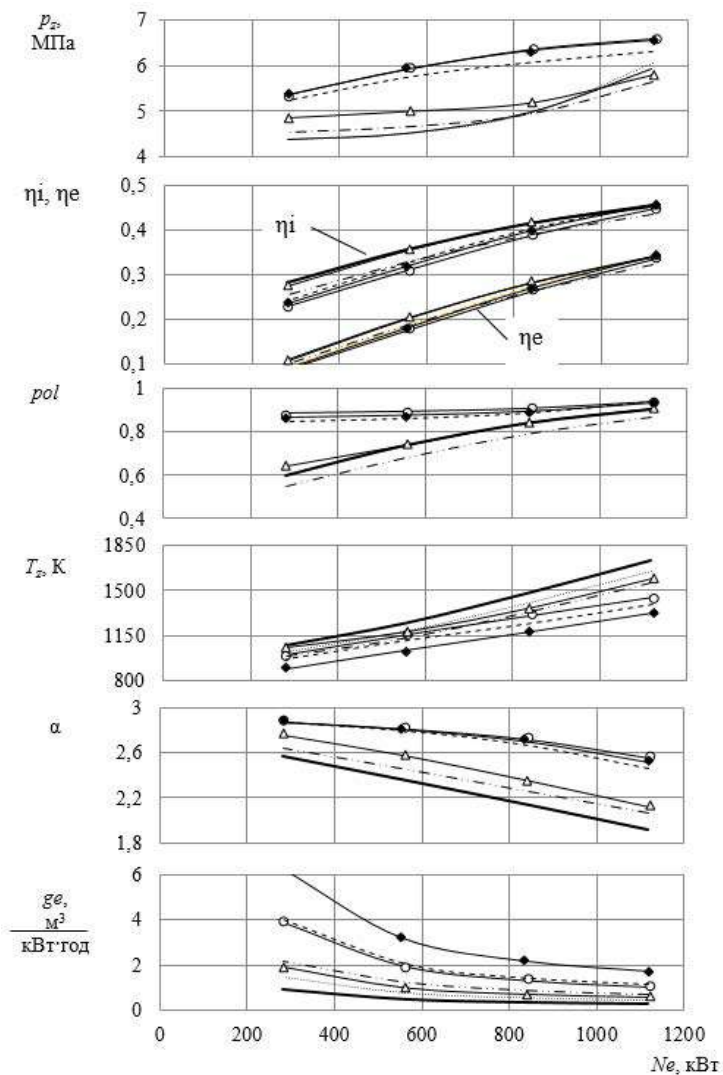


Рисунок 10. Навантажувальна характеристика двигуна 11ГД100М при використанні природного газу та НГП ( $n=750 \text{ хв}^{-1}$ ):

— — — — — Природний газ;  $\circ$  — Синтез-газ; - - - - - Піролізний газ;  
 - . . . — Шахтний газ; ..... — Біогаз;  $\Delta$  — Коксовий газ;  $\blacklozenge$  — Генераторний газ

## 1.9 Оптимізація параметрів газового двигуна 11ГД100М при використанні НГП

Відмінність фізико-хімічних властивостей низькокалорійних газових палив від природного газу призводить до зміни протікання робочого процесу дослідного двигуна 11ГД100М та в деяких випадках погіршення його показників. Отже необхідно проводити оптимізацію його параметрів.

Вибір раціональних параметрів двигуна 11ГД100М при його роботі на НГП виконано на основі сіток І. М. Соболя та Р. Б. Статнікова [47].

Для кожного НГП з використанням розробленої математичної моделі проводилися розрахункові експерименти в 512 точках. За прийнятими обмеженнями були відсіяні неефективні точки. Точка, що відповідала максимальному значенню індикаторного ККД вважалася оптимальною.

У табл. 2 наведені значення оптимізованих параметрів газового двигуна 11ГД100М для випадків використання дослідних палив.

*Таблиця 2. Оптимізовані параметри газового двигуна 11ГД100М при використанні НГП (базові параметри:  $p_s = 0,127$  МПа;  $T_s=300$  К;  $\theta = 358$  гр.п.к.в.;  $\varepsilon=12,5$ )*

Газ	$p_s$ , МПа	$T_s$ , К	$\theta$ , гр.п.к.в.	$\varepsilon$
Синтез-газ	0,115	315	354	12,5
Піролізний газ	0,117	315	356	12,5
Шахтний газ	0,112	315	357	12,5
Біогаз	0,12	310	355	12,5
Коксовий газ	0,117	315	356	12,5
Генераторний газ	0,116	320	357	12,5

Згідно табл. 2 при використанні усіх дослідних газів в двигунах ГД100 потрібно зменшувати тиск наддувочного повітря на 6-12 % та збільшувати температуру наддувочного повітря на 3-7%. Ступінь стиску  $\varepsilon$  залишаються не змінним, а кут випередження запалювання змінюються для різних НГП у незначних межах (1-4 гр.п.к.в.).

Порівняння показників двигуна 11ГД100М за базових та оптимізованих параметрів наведено на рис. 11.

При використанні рекомендованих значень параметрів двигуна відбувається збільшення максимального тиску та температури циклу, повноти згоряння палива (рис. 11). Як результат, підвищується на 2-8 % індикаторний ККД двигуна (з 0,43-0,46 до 0,46-0,49) у порівнянні з базовим варіантом.

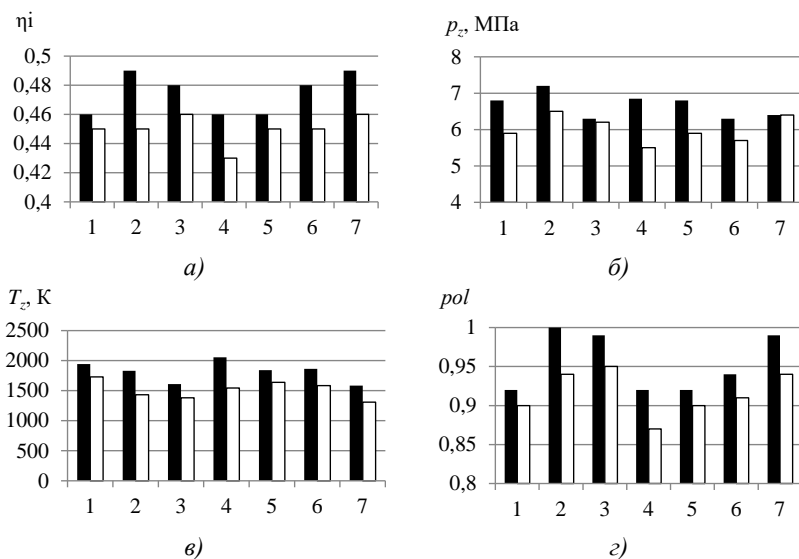


Рисунок 11. Порівняння показників газового двигуна 11ГД100М за базових та оптимізованих параметрах при використанні природного газу та НГП:

а – індикаторний ККД; б – максимальний тиск циклу; в – максимальна температура циклу; з – повнота згоряння; ■ – за оптимізованих параметрах; □ – за базових параметрах; 1 – Природний газ; 2 – Синтез-газ; 3 – Піролізний газ; 4 – Шахтний газ; 5 – Біогаз; 6 – Коксовий газ; 7 – Генераторний газ

## ВИСНОВКИ

1. Транспорт, промисловість, енергетика та сільське господарство згубно впливають на екологічну ситуацію в Україні та викликають такі негативні наслідки як парниковий ефект, кислотні дощі, руйнування озонового шару. Утилізація побічних продуктів промислового та сільськогосподарського виробництва, так званих низькокалорійних газів, дозволить не тільки покращити екологічну ситуацію, але і виробляти електроенергію та тепло, частково замінюючи корисні копалини. Одним із шляхів вирішення цієї проблем, є використання низькокалорійних газів в якості альтернативних палив для стаціонарних енергоустановок з двигунами внутрішнього згорання.

2. Проаналізовано сучасний стан проблеми виробництва і використання НГП у ДВЗ. НГП доцільно використовувати в стаціонарних двигунах з ФФЗ, які менш вимогливі до якісного та кількісного складу НГП порівняно з іншими типами ДВЗ. Запропоновано загальні підходи щодо їх конвертації.

3. Найкращими властивостями володіють НГП, що мають високі значення метанового числа, нижчої теплоти згорання, низький вміст інертних компонентів та широкі межі займання. Проте, підвищений вміст окремих компонентів НГП неоднозначно впливає на властивості палив та показники двигунів.

4. Показано, що при використанні більшості низькокалорійних газових палив на режимі номінальної потужності показники ефективності циклу майже не змінюються у порівнянні з роботою на природному газі. Проте, слід відзначити збільшення в 1,5-5,6 разів об'ємної витрати НГП внаслідок суттєвого зменшення нижчої теплоти згорання цих палив.

5. При використанні НГП в двигунах 11ГД100М потрібно зменшувати тиск наддувочного повітря на 6-12 % та збільшувати його температуру на 3-7 %. Ступінь стиску є залишається не змінним, кут випередження запалювання змінюються для різних НГП у незначних межах (1-4 гр.п.к.в.). Запропоновані значення параметрів забезпечують підвищення індикаторного ККД двигуна на 2-8 %.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Основні екологічні проблеми України [Електронний ресурс] / ECOTOWN – Режим доступу: <https://ecotown.com.ua/news/Osnovni-ekolohichni-problemy-Ukrayiny-u-2014-rotsi> – 08.12.2014.
2. Тверді побутові відходи в Україні: ПОТЕНЦІАЛ РОЗВИТКУ СЦЕНАРІЇ РОЗВИТКУ ГАЛУЗІ ПОВОДЖЕННЯ З ТВЕРДИМИ ПОБУТОВИМИ ВІДХОДАМИ Підсумковий звіт [Електронний ресурс] / Міжнародна фінансова корпорація (IFC, Група Світового банку) – Режим доступу: <https://www.ifc.org/wps/wcm/connect/504c5765-89d4-4be1-916e-ea27aa94feaf/22.+Тверді+побутові+відходи+в+Україні+ПОТЕНЦІАЛ+РОЗВИТКУ+Сценарії+розвитку+галузі+оводження+.pdf?MOD=AJPERES&CVID=INpI3Ew> –19.03.2021.
3. Канило П. М. Анализ эффективности использования альтернативных топлив в двигателях внутреннего сгорания / П. М. Канило, И. В. Парсаданов // *Двигатели внутреннего сгорания*. – 2009. – №1. – С. 8–13.
4. Ассад М. С. Влияние состава альтернативных моторных топлив на процесс их сгорания / М. С. Ассад // *Автомобильная промышленность*. – 2007. – №10. – С. 10–11.
5. Трегуб Е. Европейский опыт утилизации сбросного энергопотенциала промышленных газов / Е. Трегуб // *Электронный журнал энергосервисной компании «Экологические системы»*. – 2008. – № 4.
6. Марченко А. П. Проблемы и перспективы производства синтетических газовых топлив (Обзор) / А. П. Марченко, А. А. Осетров, С. С. Кравченко // *Энерготехнологии и ресурсосбережение*. – 2013. – №4. – С. 5-14.
7. Worldwide Gasification Database Analysis [Електронний ресурс] / National Energy Technology Laboratory (NETL) – Режим доступу: <http://www.netl.doe.gov/technologies/coalpower/gasification/worlddatabase/summary.html> – 10.2010.

8. Пятничко А. И. Результаты обследования полигонов тбо Украины для установления объемов добычи и состава биогаза / А. И. Пятничко, Г. В. Жук, В. Е. Баннов // *Технические газы*. – 2010. – №2. – С. 63–66.
9. European Biogas Association [Электронный ресурс] – режим доступа: <http://european-biogas.eu>
10. Гелетуха Г. Г. Перспективы производства и использования биогаза в Украине / Г. Г. Гелетуха, П. П. Кучерук, Ю. Б. Матвеев / Аналитическая записка БАУ // Биоэнергетическая ассоциация Украины. – 2013. – 22 с.
11. Гелетуха Г. Г. Перспективы производства тепловой энергии из биомассы в Украине / Г. Г. Гелетуха, Т. А. Железная, Е. Н. Олейник // *Промышленная теплотехника*. – 2013. – Т. 35, № 5. – С.48–55.
12. Газотурбинные электростанции [Электронный ресурс] / ООО «НИК». – режим доступа: <http://turbonik.ru/>
13. Кузьменко И. Ф. Технология комплексной переработки шахтного газа с получением товарного сниженного метана / И. Ф. Кузьменко, А. И. Рубцов, А. Л. Довбиш, А. А. Мельниченко // АГЗК+АТ. – 2011. – №5(59). – С. 5–9.
14. Энергетические установки и окружающая среда : учеб. пособ. / [В. А. Маляренко, Г. Б. Варламов, Г. Н. Любчик и др.]. – Харьков : ХГАГХ, 2002. – 398 с.
15. Пылев В. А. Шахтный газ – моторное топливо для двигателей внутреннего сгорания / В. А. Пылев, С. А. Кравченко, А. А. Прохоренко, Е. Г. Заславский, В. В. Шпаковский // *Двигатели внутреннего сгорания*, 2007. – № 1. – С. 10–15.
16. Global Methane Initiative. Метан из угольных шахт: возможности сокращения выбросов, совершенствования сбора и утилизации [электронный ресурс] Отчет GMI/ Global Methane Initiative. — 2011. – режим доступа к отчету: [https://www.globalmethane.org/documents/coal\\_fs\\_rus.pdf](https://www.globalmethane.org/documents/coal_fs_rus.pdf)

17. Gregorz Przybyla. Energy analysis of a small capacity SI engine fueled with lean air gas mixture / Gregorz Przybyla, Stefan Postrzednik, Zbigniew Zmudka // *Powertrain and Transport*. – 2012. – vol.19, №2. – P. 423–432.
18. Мысник М. И. Анализ теплофизических свойств альтернативных топлив для двигателей внутреннего сгорания / М. И. Мысник, А. Е. Свистула // *Ползуновский вестник*. – 2009. – №1-2. С. 37–43.
19. Mollenhauer K. Handbook of diesel engines / Klaus Mollenhauer, Helmut Tschoeke. – Berlin : Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2010. – 636 p.
20. Mueller G. P. Landfill Gas Application Development of the Caterpillar G3600 Spark-Ignited Gas Engine / G. P. Mueller // *J. Eng. Gas Turbines Power*. – 1995. – vol.117, №4. – P. 820–825.
21. GE Power & Water. Distributed Power [электронный ресурс]. – режим доступа: <https://www.ge-distributedpower.com/products/power-generation>
22. Буров В. Д. Потенциал применения газопоршневых двигателей зарубежных производителей на территории РФ. / В. Д. Буров, А. А. Дудолин, В. В. Макаревич, Е. В. Макаревич. // *Турбины и дизели*. – 2009. – № 3. – С. 28-33.
23. Опыт эксплуатации газопоршневых агрегатов на биогазе [Электронный ресурс] / Генрих БААС, компания DEUTZ Power Systems (MWM GmbH) – Режим доступа: [http://www.ges-ukraine.com/maininfo\\_14-17.html](http://www.ges-ukraine.com/maininfo_14-17.html)
24. Przybyla G. Performance of SI engine fuelled with LCV gas – [электронный ресурс] / G. Przybyla, L. Ziolkowski, A. Szlek – Режим доступа: [http://s3.amazonaws.com/zanran\\_storage/www.mam.gov.tr/ContentPages/17571677.pdf](http://s3.amazonaws.com/zanran_storage/www.mam.gov.tr/ContentPages/17571677.pdf)
25. Ankit B Joshi. Using biogas in SI engine by Changing ignition parameter and compression ratio: a review / Ankit B Joshi, Pratik B Umrigar, Akash B Patel, Karan A Patel // *IJSRD – International Journal for Scientific Research & Development*. – 2015. – vol. 3. – P. 751–756.
26. Przybyla. G. Assessment of the performance of a small capacity SI engine fuelled with model lean mixture of biogas // *International Journal of Thermodynamics*. – 2013. – vol. 16, №4. – P. 179–188.

27. Goto S. Developmen of Hight Density Gas Engine 22AG / S. Goto, H. Nishi, S. Nakayama, S. Takahashi // *IHI Engineering Review*. – 2004. – Vol. 37, №3. – P. 104–107.
28. Лукшо В. А. Исследования показателей двигателя с искровым зажиганием при работе на газовых топливах / В. А. Лукшо, А. В. Козлов, А. С. Теренченко, А. А. Демидов // *Транспорт на альтернативном топливе*. – 2011. – №6 (24). – С. 28–33.
29. Yamasaki Y. Combustion Characteristics of Low-Calorific-Value Gaseous Fuels in Small Gas Engine / Y. Yamasaki, G. Tomatsu, Y. Nagata, S. Kaneko // *Journal of Environment and Engineering*. – 2009. – Vol.4, №1. – P. 188–197.
30. Munoz M. Low heating value gas on spark ignition engines / M. Munoz, F. Moreno, J. Morea-Roy, J. Ruiz, J. Arauzo // *Biomass & Bioenergy*. – 2000. – №15. – P. 431–439.
31. Huang J. Assessment of simulated biogas as a fuel for the spark ignition engine / J. Huang, R. J. Crookes // *Fuel*. – 1998. – Vol. 77, №15. – P. 1793–1801.
32. Газовые двигатели Caterpillar серии G3600-G3300: руководство по выбору, монтажу и эксплуатации / G: Caterpillar. – 1997. – 46 с.
33. Roubaud A. Improving performances of a lean burn cogeneration biogas engine equipped with combustion prechambers / A. Roubaud, D. Favrat // *Fuel*. – 2005. – Vol. 84, №16. – P. 2001–2007.
34. Генкин К. И. Газовые двигатели ГД100 и агрегаты на их базе / К. И. Генкин, Д. Т. Аксенов, Б. Н. Струнге. – Л. : Недра, 1970. – 328 с.
35. Поставка газопоршневой электрической станции ГПЭС-ГД100/3000. Техпредложение / ООО «Инновационные технологии – Энергетика». – 2014. – 15 с.
36. Мотор-генераторы газовые 11ГД100М. Технические условия (ТУЗ–408-76). – [Чинний від 1976.01.10]. – Харьков : ГП «Завод им. Малышева», 1976. – 38 с.
37. Звіт № 379. О заводських и доводочных испытаниях газового двигателя 1ГД100 / Синенко / Производственное объединение «Завод имени Малышева». – Харьков, 1966 г. – 27 с.

38. Акт приемки междуведомственной комиссией головного образца модернизированного газового мотор-генератора 11ГД100М. – Харьков, 1970.
39. Газобаллонные автомобили: Справочник / А. И. Морев, В. И. Ерохов, Б.А. Бекетов и др. М.: Транспорт, 1992. – 175 с.
40. Генкин К. И. Газовые двигатели / К. И. Генкин. – М. : Машиностроения, 1977. – 196 с.
41. Shivaprasad K. V. Performance, Emission and Fuel Induction System of Hydrogen Fuel Operated Spark Ignition Engine – A Review / K. V. Shivaprasad, G. N. Kumar, K. R. Guruprasad // *International Journal of Modern Engineering Research (IJMER)*. – 2012. – Vol.2. – P. 565–571.
42. Гусаков С. В. Анализ возможности применения топлив с низкой удельной теплотой сгорания в ДВС / С. В. Гусаков, И. В. Афанасьева, Х. Мурад // *Транспорт на альтернативном топливе*. – 2011. – №2 (22). – С. 34–37.
43. Ramos J. I. Internal combustion engine modeling / J. I Ramos. – New York : Hemisphere Publishing Corporation, 1989. – 425 p.
44. Кравченко С. С. Конвертація стаціонарного двигуна ГД100 для роботи на низькокалорійних газових паливах [Електронний ресурс] : автореф. дис. ... канд. техн. наук : спец. 05.05.03 / Сергій Сергійович Кравченко ; [наук. керівник Марченко А. П.] ; Нац. техн. ун-т «Харків. політехн. ін-т». – Харків, 2016. – 21 с. – Бібліогр.: С. 16-18. – укр.
45. Arroyo J. Combustion behavior of a spark ignition engine fueled with syntetic gases derived from biogas / J.Arroyo, F. Moreno, M. Munoz, C. Monne, N. Bernai // *Fuel*. – 2014. – Vol. 117. – P. 50–58.
46. Karim G. A. Methane-carbon dioxide mixtures as a fuel / G. A. Karim, I. Wierzba. // *Natural Gas: Fuels and Fueling*. – 1992. – SEA SP-927. – P. 81–91.
47. Соболев И. М. Выбор оптимальных параметров в задачах со многими критериями / И. М. Соболев, Р. Б. Статников – М. : Наука. 1985. – 110 с.

## ДО ПИТАННЯ ПРО СТВОРЕННЯ РАДІОПРОЗОРИХ КЕРАМІЧНИХ МАТЕРІАЛІВ НА ОСНОВІ СИСТЕМИ $RO - Al_2O_3 - SiO_2$

*Лісачук Г. В., Кривобок Р. В., Зінченко С. В., Чефранов Є. В.,  
Пітак Я. М., Волощук В. В., Захаров А. В., Майстат М. С.*

### **Вступ**

Радіопрозорі матеріали – це переважно неметалеві матеріали, що забезпечують пропускання електромагнітного випромінювання радіочастотного діапазону ( $10^5 - 10^{12}$  Гц) при мінімальному його відбитті. Поширюючись в об'ємі цих матеріалів, електромагнітне випромінювання (ЕМВ) створює змінне електричне поле, енергія якого мінімально перетворюється на теплову енергію [1].

Проблема створення головних обтічників нерозривно пов'язана з синтезом матеріалів, здатних виконувати захисну функцію та забезпечувати надійний радіозв'язок літальних апаратів (ЛА), а також з розробкою технології їх виробництва та проектування оптимальних конструкцій за ваговими і радіотехнічними параметрами.

У сучасних ЛА використовуються деталі, створені на базі склопластиків, керамічних матеріалів, ситалів і вуглепластиків. Величезну нішу в певному класі облаштування ЛА займають склопластики, але проблеми, пов'язані з подальшим їх вдосконаленням, повною мірою не вирішені до теперішнього часу. Незважаючи на значний прогрес в індустрії полімерних композиційних матеріалів, принципового поліпшення характеристик обтічників з композиційних матеріалів, у порівнянні з кварцовою керамікою, отримати не вдається.

Кварцова кераміка нині обґрунтовано зайняла передове місце серед матеріалів для радіопрозорих обтічників надшвидкісних ЛА. Однак порівняно невисока міцність і низький температурний коефіцієнт лінійного розширення (ТКЛР) ускладнюють проектування високонавантажених, відповідальних елементів літальних апаратів з кварцової кераміки [2].

Одним з важливих завдань при створенні обтічників з композиційних і керамічних матеріалів, є розробка ефективної конструкції з'єднання обтічника з корпусом літального апарату. Крихкий характер руйнування, велика чутливість кераміки до концентраторів напруг, низькі властивості міцності на зріз і зминання ускладнюють застосування традиційних способів з'єднань. Істотна різниця значень ТКЛР металів і кераміки вимагає розробки та застосування спеціальних конструктивних рішень, здатних компенсувати різницю розширення з'єднувальних елементів при підвищених температурах експлуатації для запобігання виникненню додаткових напружень.

Таким чином, проектування обтічників ЛА є комплексним завданням по розробці матеріалу, технології виготовлення та оптимізації конструкції, що забезпечує виконання вимог складної прикладної задачі [3].

### **Вимоги до радіопрозорих керамічних матеріалів**

Згідно узагальненим літературним даним [4 – 9] головними вимогами до керамічних радіопрозорих матеріалів є низькі значення діелектричних властивостей, а саме значення діелектричної проникності в межах від 2 до 10 та значення тангенса кута діелектричних втрат в межах  $10^{-4}$  –  $10^{-2}$  в області надвисоких частот. Нижче наведені основні властивості до радіопрозорих керамічних матеріалів:

- діапазон робочих температур: від  $-60$  до  $+1300$  °С;
- тривалість дії робочих температур:  $1200$  °С – 5 хв.
- межа міцності при вигині  $\geq 60$  МПа;
- ТКЛР  $\leq 40 \cdot 10^{-7}$  град $^{-1}$ ;
- водопоглинання  $\leq 0,1$  %;
- стабільність фізичних і радіофізичних характеристик при високих температурах в широкому частотному діапазоні;
- обов'язково характеризуватися структурною стабільністю, що в підсумку визначає стабільність температурних та радіофізичних властивостей матеріалу, тобто його працездатність і надійність протягом тривалого часу.

Весь складний комплекс вказаних параметрів повинен співвідноситись з високою технологічністю складу та процесу виготовлення матеріалу, а сам матеріал повинен мати низьку собівартість.

### **Особливості технології виготовлення обтічників літальних апаратів**

Головні антени обтічники є одним з важливих елементів конструкції ЛА, в значній мірі визначають аеродинамічні характеристики і точність наведення на ціль. До них пред'являються типові для ЛА вимоги мінімальної маси при забезпеченні достатньої міцності і надійності. У зв'язку з широким застосуванням інфрачервоних і радіолокаційних систем управління обтічники як головні, так і розташовані на корпусі ЛА, повинні володіти комплексом радіотехнічних властивостей, тобто радіохвилі заданого спектру частот не повинні зазнавати спотворень і ослаблення потужності електромагнітного потоку. З цим безпосередньо пов'язані і захисні функції обтічника з метою забезпечення працездатності апаратури в умовах діючих теплових і аеродинамічних навантажень [3].

Процес виготовлення обтічників для літальних апаратів складається з декількох етапів, починаючи з підготовки сировинних матеріалів і закінчуючи формуванням та випалом виробів.

Спочатку сировину подрібнюють для досягнення високої дисперсності. У виробництві тонкої кераміки використовуються порошки з розміром частинок від 1–3 мкм та менше. Для подрібнення використовують конусні, кульові та вібраційні млини. Використання вібраційних млинів дозволяє значно знизити тривалість циклу помелу та отримати матеріал з підвищеною дисперсністю. Як подрібнюючі тіла використовують переважно фарфорові кулі, оскільки при застосуванні залізних куль неодмінним є намет заліза. Також, при помелі можуть використовувати різні поверхнево-активні речовини (ПАР). За останній час їх роль, у виробництві електро- та радіо кераміки значно виросла, бо додавання ПАР значно прискорюють процес помелу.

Далі компоненти змішуються, до отримання однорідного хімічного,

зернового та мінерального складу. Іноді додають пластифікатори, тимчасові технологічні зв'язки, які забезпечують необхідні формувальні властивості для отримання бездефектних заготовок [8].

У залежності від виду кераміки та способу формування можуть використовувати як природну, так і технічну сировину, які мають свої особливості підготовки.

Після підготовки сировинних матеріалів відбувається процес формування, який є важливим технологічним етапом, оскільки помилки, допущені в ньому, можуть викликати непоправні наслідки в наступних операціях та призвести до браку виробів. Вимоги до цього технологічного процесу досить високі та виходять з того, що сирець не повинен втратити форму при подальших процесах сушіння, випалу, транспортування. Після формування у напівфабрикаті не повинно бути внутрішніх напружень. Для формування великогабаритних обтічників ЛА використовують переважно шлікерне лиття у пористі форми, термопластичне або електрофоретичне формування. Обтічники більш прості форми виготовляють методом пресування.

Обтічники з кварцової кераміки виготовляються переважно методом лиття у пористі гіпсові форми. Матеріал, який отримують таким методом, має високу щільність упаковки часточок шлікеру та високу міцність на згин. Для формування використовують висококонцентровані шлікери з середньою щільністю  $\rho = 1860-1920 \text{ кг/м}^3$  та в'язкістю суспензії не більше однієї хвилини за приладом «Віскозиметр ВЗ-1». Недоліком цього методу є обмеженість його використання: тільки для формування тонкостінних та рівнотовщинних виробів. Крім того, щільність набраного шару на поверхні пористої форми ускладнює відсмоктування води та тим самим, зменшує швидкість набору заготовки. Це призводить до довження процесу набору та супроводжується збільшенням гравітаційного осадження частинок, що може погіршити однорідність та міцність оболонки обтічника [3].

Стадія термообробки є важливим завершуючим процесом виробництва керамічних обтічників. У процесі випалу випаровується вода, видаляється тимчасова зв'язка або гази, відбувається поліморфні перетворення, змінюються розміри та

щільність, утворюються кристалічні або аморфні фази та інші процеси. Температура та умови випалу залежать від складу матеріалу та виду кераміки. При виробництві конструкційних керамічних деталей слід суворо додержуватись обраних режимів випалу, які забезпечують сталість та відтворюваність властивостей готових виробів.

Після термічної обробки обтічники з кварцової кераміки піддають шліфуванню алмазними інструментами на металічній зв'язці на токарно-центрових та токарно-копіювальних станках. Цей технологічний етап доволі складний, враховуючи високу твердість та низьку щільність матеріалу обтічника, а також жорсткі вимоги до точності розмірів деталей та чистоти оброблюваної поверхні [3].

### **Розробка технологічних основ отримання радіопрозорої керамічних виробів**

У якості сировинних компонентів використовували сировинні компоненти: кварц молотий пилоподібний, технічний глинозем Г-00, карбонат стронцію, карбонат барію, карбонат літію та оксид стануму, шихтовий та хімічні склади наведено у табл. 1 та 2.

*Таблиця 1. Шихтовий склад цельзіан-славсонітової радіопрозраї кераміки*

Сировинні компоненти	Вміст компонентів в мас. %
	РПК-1
Кварц молотий пилоподібний ГОСТ 9077-82	31,46
Технічний глинозем Г-00 ТУ У 07.2-33133003-012:2019	26,80
Карбонат стронцію (ХЧ) ТУ 6-09-1609-77	30,14
Карбонат барію (ХЧ) ГОСТ 4158-80	11,60
Карбонат літію ТУ 6-09-4757-84	0,41
Оксид стануму ГОСТ 22516-77	0,83

Таблиця 2. Хімічний склад цельзіан-славсонітової радіопрозорої кераміки

Композиція	Вміст оксидів, мас. %							
	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	Na <sub>2</sub> O	BaO	SrO	в.п.п
РПК-1	31,26	26,58	0,02	0,01	0,07	9,01	20,95	12,09

Для розробки технології створення виробів з радіопрозорої кераміки, зокрема етапу формування зразків, досліджувався метод лиття водних шлікерів.

### **Виготовлення виробів на основі радіопрозорої кераміки методом лиття водних суспензій**

Для підтвердження можливості впровадження виготовлення керамічних наконечників на Костянтинівському державному науково-виробничому підприємстві «Кварсит», з розроблених в НТУ «ХПІ» складів радіопрозорої кераміки, було проведено виробничий експеримент. Синтезовану цельзіан-славсонітову кераміку у вигляді брикетів-напівфабрикатів використали при приготуванні шлікеру та відливки на його основі виробів за технологічною схемою виготовлення наконечників на основі ситалу АС-418. Для досягнення подібних параметрів шлікеру отримано наступні показники:

- час помелу – 31 година;
- густина шлікера – 1,551 г/см<sup>3</sup>;
- тонина помелу < 63 мкм;
- вологість шлікера – 50 %.

На основі отриманого шлікера було вилито заготовки для отримання зразків для фізико-механічних досліджень. Заготовки випалювали в НТУ «ХПІ» в муфельній печі при температурі 1350 °С. Випалені зразки мали значну вогневу усадку 18-20 %, що викликала значні дефекти в структурі зразків (рис. ).

Даний ефект викликаний низькою щільністю сирцю, сформованого шлікерним литтям, що в свою чергу викликано високою вологістю шлікера (50 %).

Результати роботи свідчили про необхідність вдосконалення існуючої

технології отримання виробів методом шлікерного лиття. Для запобігання



*Рисунок 1. Обтічник з дефектами*

можливих дефектів при створенні виробів, було прийнято рішення отримати шлікер з оптимальними параметрами, з вологістю в межах 30-33 %. Для виконання поставленої задачі необхідно експериментально дослідити наступні характеристики:

- тонину помелу;
- добавка для покращення текучості шлікеру та її кількість;
- температуру випалу готових виробів.

В лабораторних умовах сировинні матеріали дозували та змішували в планетарному млині сухим способом. Компоненти шихти були попередньо дисперговані, тому додаткового помелу не потребували. Формування брикетів проводили напівсухим способом, на лабораторному пресі під тиском 20 МПа. В якості тимчасової зв'язки використовувався 8 % розчин КМЦ. Після сушки до залишкової вологості 1 % брикети випалювали в лабораторній муфельній печі при температурі 1200 °С з витримкою 2 години та охолоджували разом із пічню.

Перед приготуванням шлікера випалені брикети кераміки подрібнювали до розмірів менше 3 мм та попередньо розмелювались в планетарному млині до максимального розміру зерен 0,1 мм. Приготування шлікеру відбувалось в шаровому млині (4 години). В якості добавки для покращення текучості

шлікера використовували Dolapix PC 67 фірми Zchimmer&Schwarz (Німеччина). Приготування шлікеру відбувалось в шаровому млині до залишку на ситі № 0063 1 мас. %. З отриманого шлікера в гіпсові форми відливалися заготовки для проведення поставлених досліджень (встановлення водопоглинання, уявної щільності, відкритої поруватості та межі міцності при згині).

### **Визначення властивостей шлікерів**

Для різних видів кераміки оптимальні значення текучості та загусності різняться: текучість 20-35 с, коефіцієнт загусності 1,7-2,5 для хімістійкого фарфору [10]; текучість 15-25 с для фаянсових, 10-20 с напівфарфорових та 10-15 с для фарфорових шлікерів, коефіцієнт загусності 1,5-2,5 для фаянсових, 1,8-2,2 для фарфорових шлікерів [11], для шлікерів на основі глинозему оптимальна текучість в межах 4-10 с [12], в той час значення цих показників для цельзіан-славсонітової кераміки зовсім відсутні, тому в умовах наливного методу вирішено орієнтуватись на середні значення, наближені до технічної кераміки – текучість 15-25 с, коефіцієнт загусності 1,7-2,5.

Коефіцієнт загусності є дуже важливим показником якості шлікеру, так як при технологічному процесі необхідно, щоб шлікер зберігав свої властивості. В іншому випадку це може призвести до застоювання шлікера у ємностях для зберігання і в трубах подачі, що призведе до негативних наслідків і застою технологічного процесу. Показником загусності є відношення часу витікання 100 см<sup>3</sup> ливарного шлікеру, витриманого в посудині віскозиметру в спокійному стані протягом 30 хв., до часу витікання того ж шлікеру, витриманого в стані спокою 30 сек. Для визначення коефіцієнту загусності вимірюють витік шлікеру після 30 секунд настоювання. Потім вимірюють швидкість витоку шлікеру після 30 хвил. вистоювання в ємності віскозиметра. У всіх випадках вимірювання швидкості витоку повторюють по три рази, після чого вираховують середнє арифметичне.

Для дослідження впливу добавки на параметри шлікеру було обрано розріджувач Dolapix PC 67, який має широкий інтервал дефлюкації і протидіє

тиксотропії. Він не піниться. Оскільки продукт є рідким і, таким чином, повністю дисоціюється, починається дефлокуючий ефект відразу після додавання [13]. Отже, в будь-який час можна регулювати в'язкість шлікеру за рахунок швидкого, однорідного включення в ковзання, наприклад, безпосередньо на лінії розливання. Цей процес є результатом, з одного боку, катіонного обміну добавки зі шлікером, а також впливу на цей подвійний електричний шар мінеральних частинок. З іншого боку, полімерні ланцюги приєднуються до частинок мінералів і, таким чином, впливають на стеричне відштовхування. Кількість, яка повинна бути додана, коливається в межах від 0,1 до 0,5 % від вмісту сухої твердої речовини.

Текучість та загусність шлікера досліджувались в залежності від вологості шлікера без добавки та з додаванням 0,1, 0,15 та 0,2 мас. % розріджуючої добавки Dolapix PC 67. Отримані результати наведені в табл. 3.

*Таблиця 3. Параметри целюзан-слаксонітового шлікера складу РПК-1*

Добавка	Кількість добавки	Вологість шлікера, %	Текучість шлікера, с	Коефіцієнт загусності шлікера
Без добавки	–	38	17,6	-
		36	25,2	-
		34	-	-
Dolapix PC 67	0,1	32	21	2,07
	0,1	31	24	2,0
	0,1	30	31	1,88
	0,15	32	12	1,77
	0,15	31	14	1,65
	0,15	30	17	1,5
	0,2	32	7	1,66
	0,2	31	11	1,43
	0,2	30	13	1,45

З отриманих даних видно, що шлікер без добавки при вологості більше 36 % характеризується високою текучістю, а при вологості 34 % шлікер не є технологічним, досліджувані шлікери схильні до тиксотропних процесів – спостерігається розшарування суспензії. Загусність шлікера не вдалося встановити, так як через півгодинну витримку в стані спокою, він залишався

в віскозиметрі (максимальний об'єм, що витікав, складав не більше 30 см<sup>3</sup>).

Шлікер на основі складу РПК-1 характеризується оптимальними параметрами при меншій вологості. Так як було зроблене припущення, що для цельзіан-славсонітової кераміки в умовах наливного методу необхідно орієнтуватись на наступні середні значення: текучість 15-25 с, коефіцієнт загусності 1,7-2,5. В заданий інтервал текучості потрапляє шлікер з вмістом розріджувача 0,1 мас. % та з вологістю 31 та 32 %, а також при додаванні 0,15 мас. % розріджувача і вологості 30 %. Коефіцієнт загусності шлікера є задовільним з додаванням 0,1 мас. % добавки в межах дослідженого інтервалу вологості, а також при додаванні Dolarix PC 67 у кількості 0,15 мас. % при вологості 32 %.

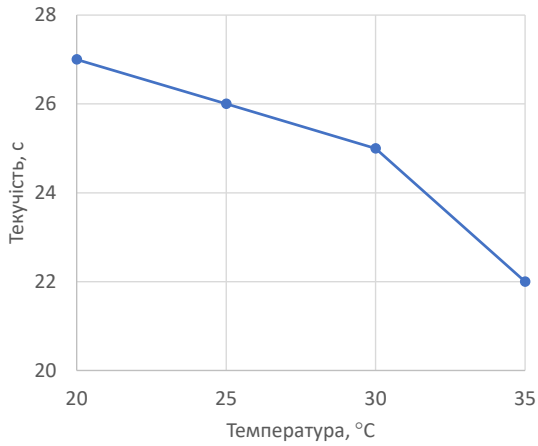
За результатами дослідження заданим вимогам відповідає цельзіан-славсонітовий шлікер при додаванні добавки Dolarix PC 67 у кількості 0,1 мас. % з розрахунку на суху речовину. Шляхом додавання добавки Dolarix PC 67 було вирішено задачу зменшення вологості шлікера, його використання націлене на керування додаткових характеристик (загусність, міцність сирцю).

Також в роботі досліджувався вплив температури на текучість та загусність. Дослідження проводили на шлікері складу РПК-1 вологість складала 30 % та 0,1 мас. % добавки Dolarix PC 67. Температура шлікера складала 20 (кімнатна), 25, 30 та 35 °С, експеримент показав позитивний її вплив, результати графічно приведені на рис. 2.

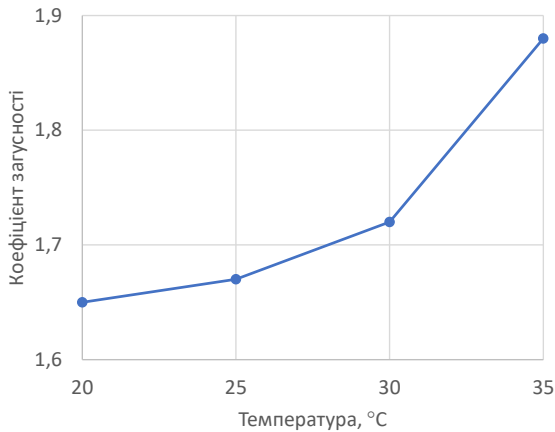
Для дослідженого шлікера підйом температури до 35 С значно покращує властивості, тому технологічний прийом підігріву шлікера при виробництві радіопрозорих обтічників є доцільним. Також слід зазначити, при зниженні вологості шлікеру спостерігається неповне заповнення гіпсової форми, що виражається наявністю порожот в двох з трьох зразків виробу-сирцю. Для запобігання даному дефекту рекомендовано використовувати вібростіл.

Шлікер виливали в попередньо висушені гіпсові форми. Зовнішній вигляд гіпсових форм при литті та отримані виробу-сирцю приведено на рис. 3.

За відсутності в шлікері глинистих компонентів та відповідно практично нульовій повітряній усадці, на даному етапі, в гіпсові форми прокладали



а) текучість



б) коефіцієнт загусності

*Рисунок 2. Параметри шлікера целъзіанової-славсонітової кераміки в залежності від впливу температури*



*Рисунок 3. Зовнішній вигляд гіпсової форми при литті та вироб-сирець*

фільтрувальний папір. Це дало змогу вільно виймати заготовку з форми після її сушки. Також спостерігалась низька механічна міцність заготовок, що проявлялась у вигляді сколів при незначному натисканні.

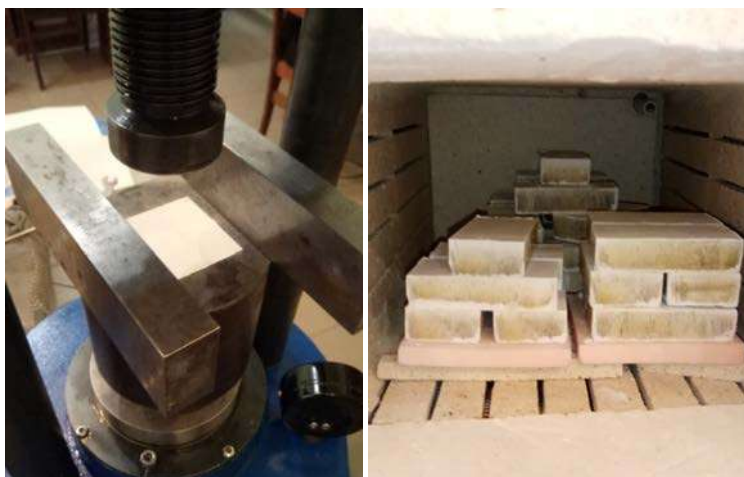
#### **Дослідження властивостей кераміки отриманої методом шлікерного лиття**

На основі встановлених оптимальних параметрів шлікера запропоновано наступну технологію отримання радіопрозорої цельзіан-славсонітової кераміки. До першої стадії відноситься отримання (синтез) цельзіан-славсонітових брикетів за температури 120 °С з витримкою протягом 2 годин. Для активації процесу синтезу та зниження його температури в масу вводять евтектичну добавку на основі оксидів літію та стануму (температура синтезу евтектичної добавки 670 °С, витримка 1 година). Випал брикетів цельзіан-славсонітового складу супроводжується великою усадкою внаслідок дисоціації  $\text{SrCO}_3$  та  $\text{BaCO}_3$  (до 20 %), що не дозволяє отримувати вироби в одну стадію.

Сировинна суміш для отримання спеку цельзіан-славсонітової кераміки складається з сухих компонентів у співвідношенні (табл. 1), шляхом вагового дозування з додаванням евтектичної добавки в кількості 1 мас. % понад 100 мас. %. Дозування проводиться безпосередньо в планетарний млин сухого помелу періодичної дії об'ємом 100 мл та проводиться усереднення компонентів

протягом 15 хвилин з додаванням водного 3 %-го розчину карбоксиметилцелюлози (КМЦ) з розрахунку отримання шихти з вологістю 8 %.

Отриману шихту формують методом напівсухого пресування на гідравлічному пресі у вигляді брикетів розміром 50 × 50 мм та висотою 20 мм (рис. 4).



*Рисунок 4. Отримання брикетів способом напівсухого пресування*

Відформовані брикети висушують у сушильній шафі за температури 110 °С та синтезують в муфельній печі за температури 1200 °С з витримкою протягом 2 годин. Синтезований матеріал подрібнюють до розмірів фракції не більше 3 мм та завантажують до шарового млина (об'ємом 5 літрів) з додаванням дистильованої води та розріджувача Dolapix PC 67 з розрахунку отримання шлікера з вологістю 30 %. Помел проводять до залишку на ситі № 0063 не більше 1 %. Формування зразків відбувається методом лиття суспензії у гіпсові форми (рис. 5). Час набору черепка зразків у формі збільшується при збільшенні кількості заливок. Максимальна кількість заливок форми – 10 разів, після чого форму змінюють на нову.



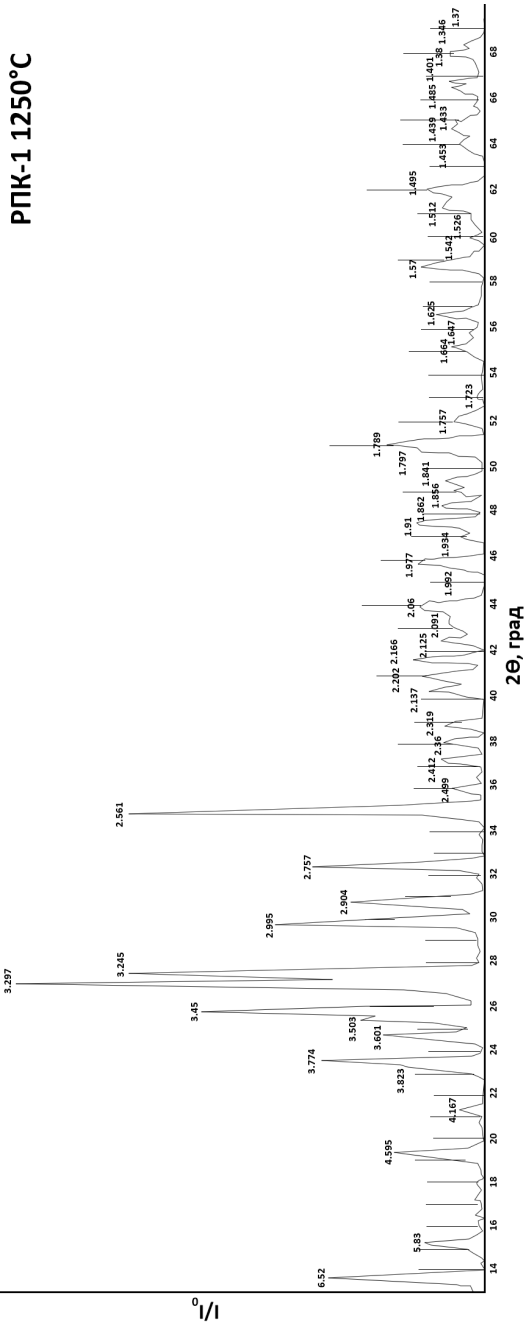
*Рисунок 5. Гіпсова форма для формування обтічника та її складові*

Сушка заготовок проходить у сушильній шафі протягом 3 годин за температури 110 °С (остаточна вологість до 1 %). Випал зразків проводять у муфельній печі за температур 1250, 1350 та 1400 °С та при витримці за максимальної температури 2 години. Далі проводили механічну обробку зразків.

### **Дослідження фазового складу і структури отриманих матеріалів**

Структурно-фазові особливості отриманої кераміки досліджені методами РФА і скануючої електронної мікроскопії. Результати якісного рентгенофазового аналізу показали, що при температурах випалу понад 1250 °С у всіх зразках присутня тільки фаза  $Ba_{0.25}Sr_{0.75}Al_2Si_2O_8$ , що говорить про повноту протікання реакцій утворення основної фази. Рентгенограми зразків надані на рис. 6-8. Ідентифікацію фаз проводили з використанням картотеки ASTM [14].

Мікрофотознімки зламу зразків, отриманих при різних температурах випалу, представлені на рис. 9-11.



*Рисунок 6. Рентгенограмма зразка РПК-1, вимішеного при температурі 1250 °С*

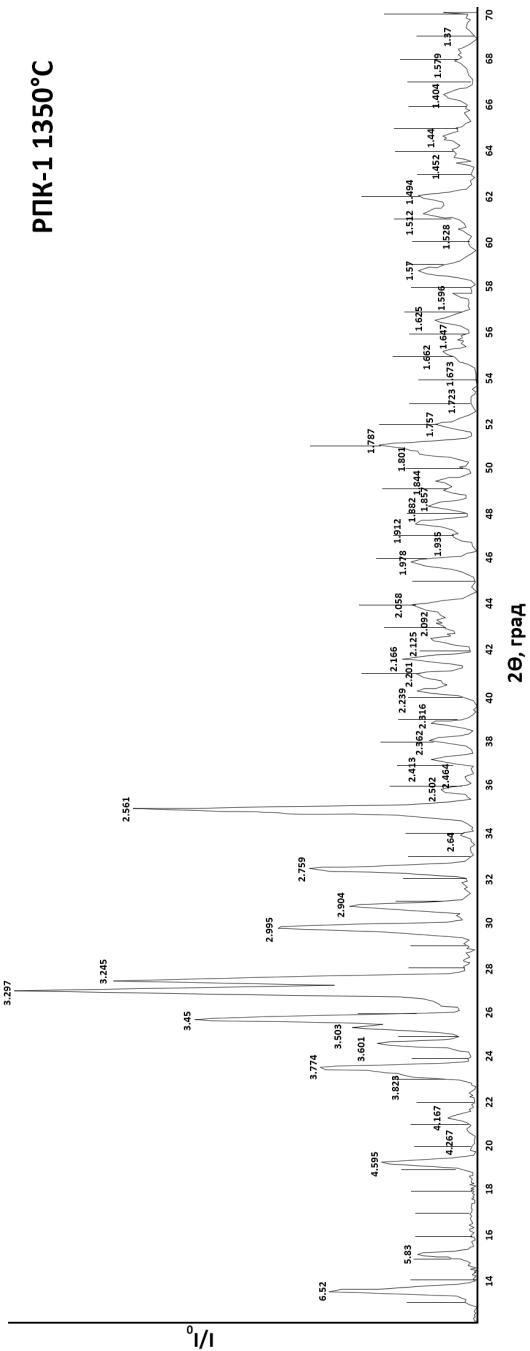
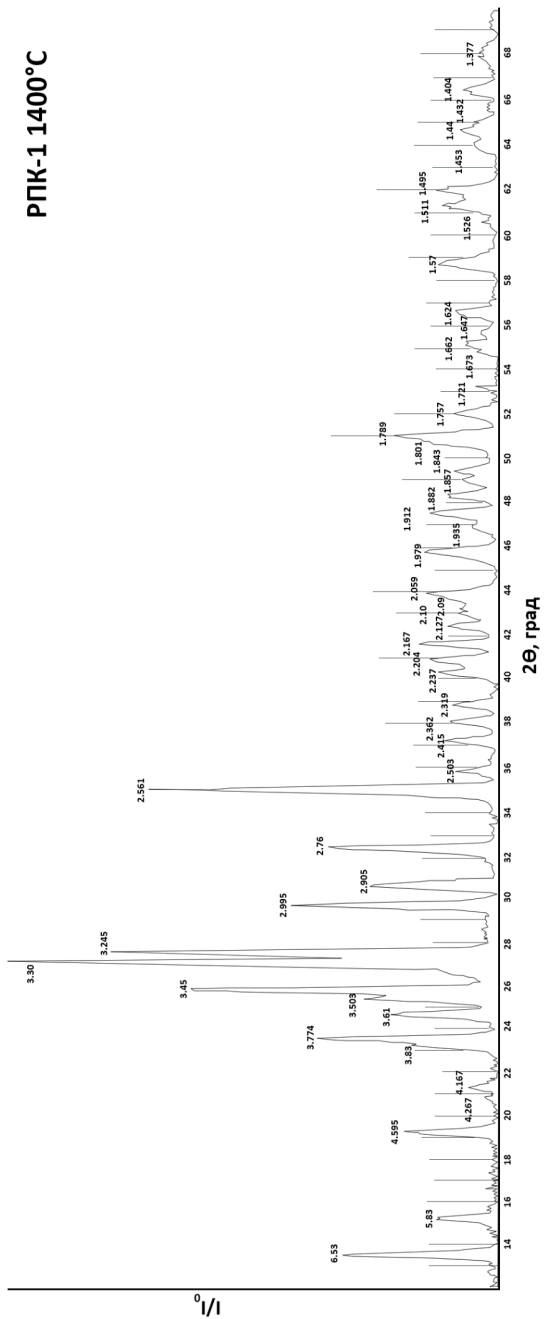
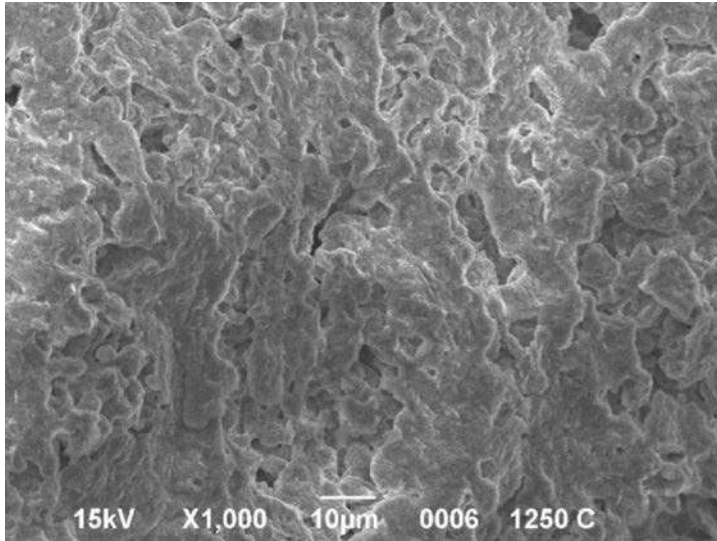


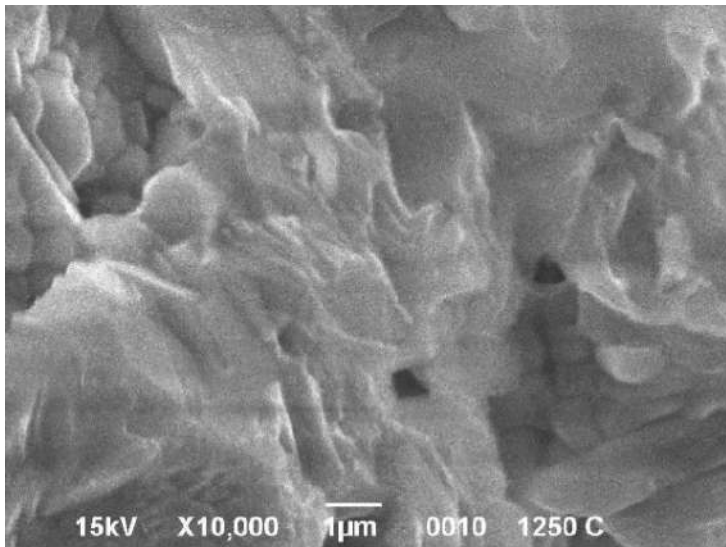
Рисунок 7. Рентгенограмма зразка РПК-1, випаленого при температурі 1350 °С



*Рисунок 8. Рентгенограма зразка РПК-1, випаленого при температурі 1400 °С*

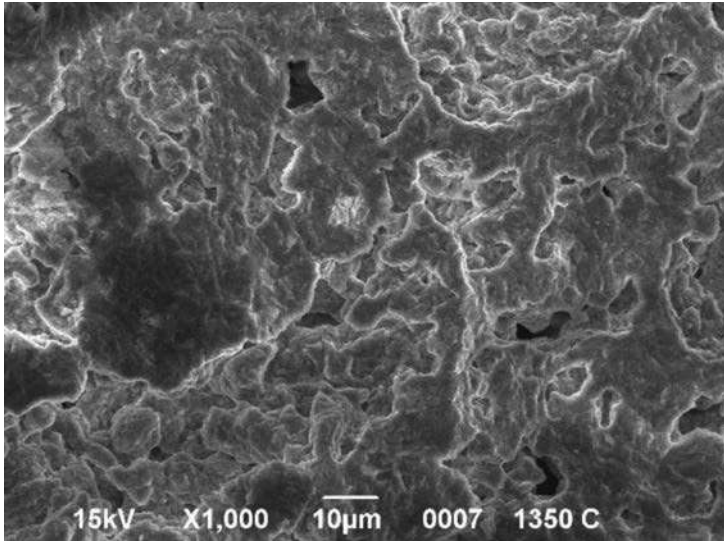


а) при збільшенні в 1000 раз

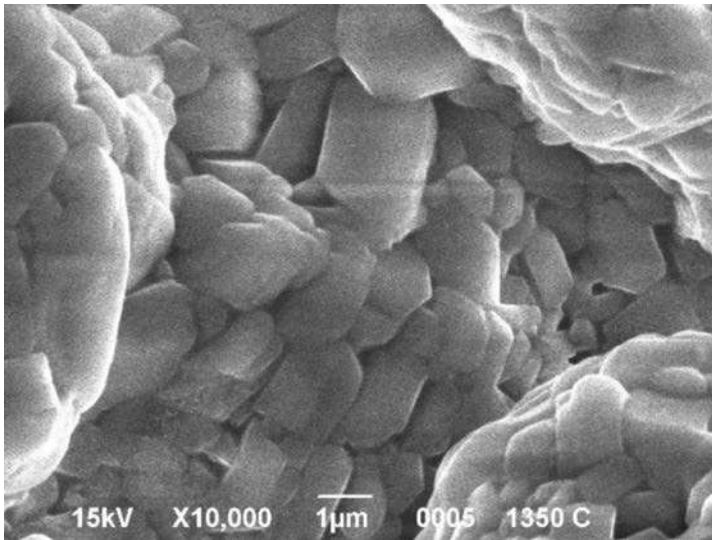


б) при збільшенні в 10000 раз

*Рисунок 9. Мікроструктура зразка, синтезованого при 1250 °C*

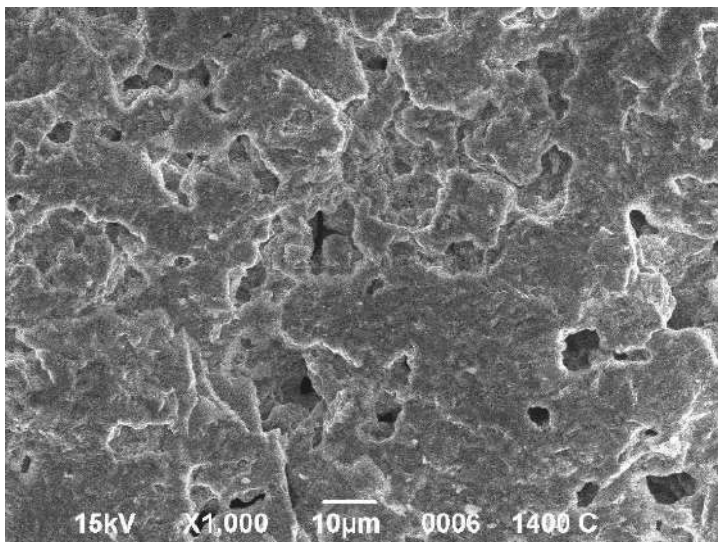


а) при збільшенні в 1000 раз

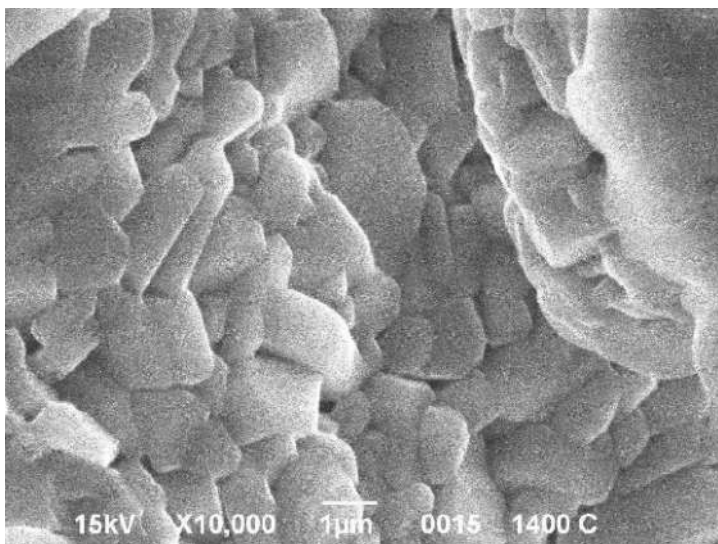


б) при збільшенні в 10000 раз

*Рисунок 10. Мікроструктура зразка, синтезованого при 1350 C*



а) при збільшенні в 1000 раз



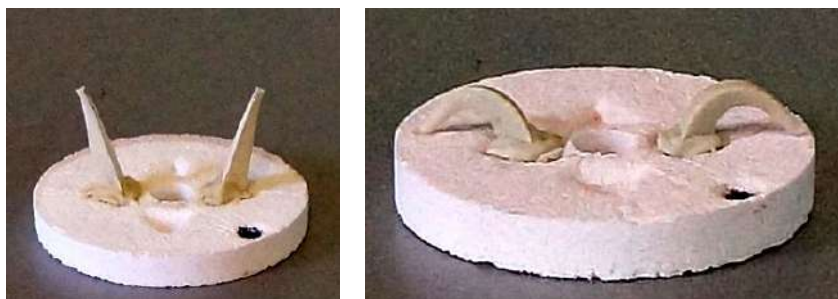
б) при збільшенні в 10000 раз

*Рисунок 11. Мікроструктура зразка, синтезованого при 1400 °C*

Як показали результати електронної мікроскопії (рис. 6-8), структура зразка кераміки яка представлена твердим розчином є однорідною, без дефектів і тріщин.

Знімки зі збільшенням  $\times 1000$  (рис. 6(а), 7(а), 8(а)) дозволяють оцінити природну шорсткість поверхні відколу, пористість зразка і однорідність структури матеріалу. На SEM-знімках зі збільшенням ( $\times 10000$ ) (рис. 6(б), 7(б), 8(б)) представлені окремі ділянки кераміки. Бачимо, що при підвищенні температури від  $1350\text{ }^{\circ}\text{C}$  починається активне зростання кристалів твердого розчину.

Також для зразка цельзіан-славсонітової кераміки, випаленого за температури  $1350\text{ }^{\circ}\text{C}$ , визначалася вогнетривкість інструментальним методом. Із аналітичної проби для визначення вогнетривкості було виготовлено два конуси – випробні зразки. Зовнішній вигляд конусів (випробних зразків) із аналітичної проби до випробовування та після випробовування наведено на рис. 12.



а)

б)

*Рисунок 12. Зовнішній вигляд конусів (випробних зразків)*

*а – підготовлені для випробовування конуси; б – під час випробовування конуси схилилися однаково за температури плавлення*

За результатами випробувань вогнетривкість складала  $1670 \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

## Кінетика подрібнення часток у шлікері

Від розміру часток та їх співвідношення залежать властивості шлікеру.

Для встановлення тонини помелу частинок було досліджено приготований шлікер, що відрізнявся часом диспергування в планетарному млині, що відповідав 10, 20 та 30 хвилинам. Дослідження проводились за допомогою приладу седіграф, результати наведено на рис. 13-15.

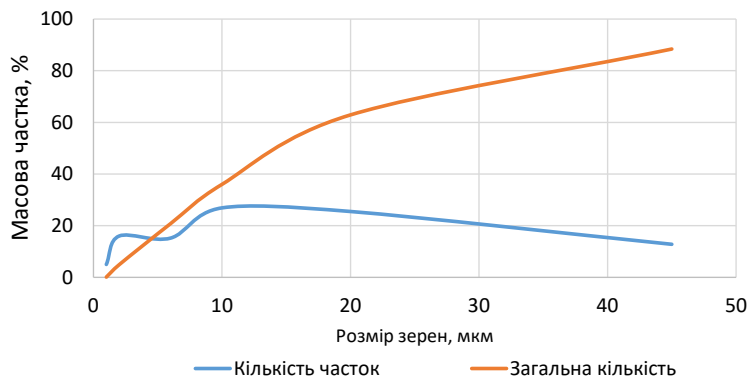


Рисунок 13. Графічна інтерпретація характеристики крупності розподілу розміру часток в об'ємі проби через 10 хвилин помелу

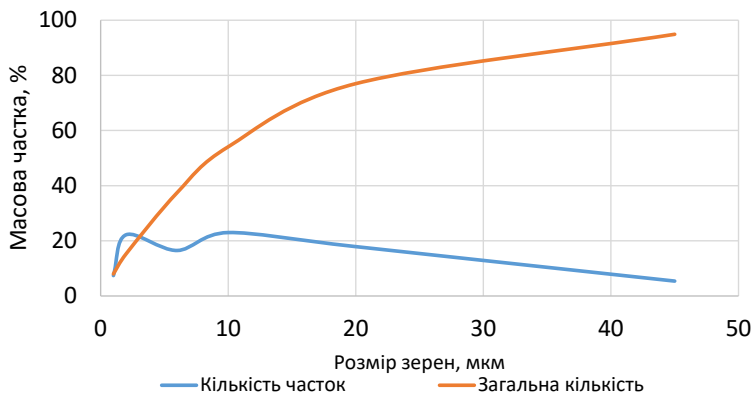
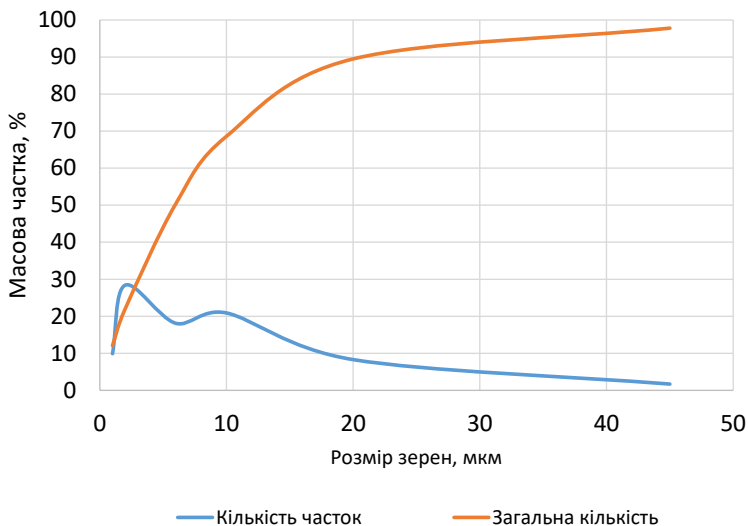


Рисунок 14. Графічна інтерпретація характеристики крупності розподілу розміру часток в об'ємі проби через 20 хвилин помелу



*Рисунок 15. Графічна інтерпретація характеристики крупності розподілу розміру часток в об'ємі проби через 30 хвилин помелу*

Кінетика подрібнення добре простежується зі зміною дисперсності синтезованого барій-стронцієвого анортиту. Наведені графічні інтерпретації (рис. 13-15) відображають реальну картину зміни дисперсності продукту подрібнення в часі. Очевидним є факт її збільшення з плином часу, але одночасно і зниження швидкості цього збільшення. Так, порівняння характеристик при 20- і 30-тихвилинному помелу вказує на її деякий зсув у бік більш дрібного продукту, з поступовим зменшенням максимуму, що характеризується розміром в 10 мкм. Вивчення сумарних характеристик крупності, отриманих за допомогою лазерного мікроаналізатора «SediGraph III», дає можливість встановити взаємозв'язок між розміром певного класу і його часткою в загальній масі продукту. У табл. 4 представлені дані для порошку отриманого зі шлікеру при різному часі помелу. За визначальний параметр прийнята деяка частка класу (фракції) від 5 до 80 % і встановлено її максимальний розмір.

Таблиця 4 Частка розмірів частинок при різній тривалості помелу

Частка фракції	Максимальний розмір зерен при різному часі помелу, мкм		
	10 хв	20 хв	30 хв
5	2,16	1,0	0,97
20	5,84	2,68	1,79
50	14,23	8,53	6,05
80	36,39	23,12	13,76

За даними табл. 4 чітко простежується зменшення розміру часток і підвищення частки менших фракцій при збільшенні часу помелу. За 30 хвилин обробки в планетарному млині 80 % розміру часток не перевищує 13,76 мкм.

#### **Визначення експлуатаційних властивостей зразків**

Для випалу були відібрані зразки складу РПК-1, шлікер яких характеризувався оптимальними властивостями при різній вологості, добавками та температурою розливу. Випал отриманих зразків проводили при трьох температурах – 1250, 1350 та 1400 °С з витримкою при максимальній температурі 2 години, випалені зразки кераміки характеризувались відсутністю дефектів. Результати досліджень експлуатаційних властивостей зразків представлені в табл. 5-6.

Для наочності на основі отриманих даних побудовано графічні інтерпретації властивостей отриманих зразків кераміки в залежності від вмісту води в шлікері з розріджуючою добавкою та температури.

При виготовленні зразків з славсонітової кераміки (рис. 16-18) використовували:

- I – шлікер з вологістю 31 % та з 0,1 мас. % Dolarix PC 67;
- II – шлікер з вологістю 30 % та з 0,1 мас. % Dolarix PC 67 при 35 °С;
- III – шлікер з вологістю 36 %

Аналіз даних проведеного експерименту свідчить про те, що рамках виміряних властивостей, досягнуто зниження вологості шлікера на основі маси

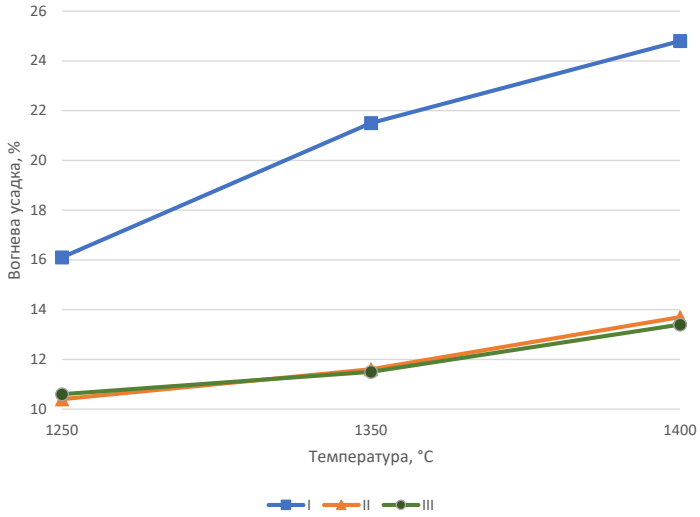
Таблиця 5. Вогнева усадка керамічних зразків залежно від параметрів шлікера і температури випалу

Добавка	Вологість шлікера, %	Температура шлікера, °С	Температура випалу, °С	Вогнева усадка, %
Без добавки	36	20	1250	16,1
	36	20	1350	21,5
	36	20	1400	24,8
Dolarix PC 67 (0,1 мас.%)	31	20	1250	10,6
	31	20	1350	11,5
	31	20	1400	13,4
	30	35	1250	10,4
	30	35	1350	11,6
	30	35	1400	13,7

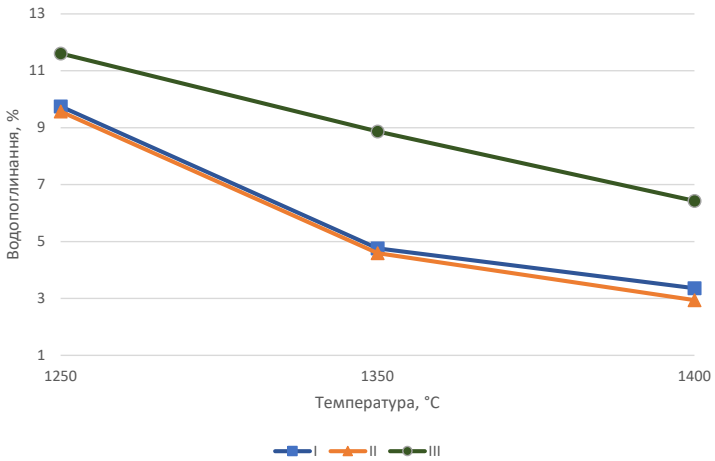
Таблиця 6. Фізико-технічні властивості зразків складу РПК-1

Добавка	Водопоглинання, %	Відкрита поруватість, %	Уявна щільність, г/см <sup>3</sup>
Без добавки	11,61	25,29	2,18
	8,87	21,21	2,41
	6,43	17,0	2,65
Dolarix PC 67 (0,1 мас.%)	9,75	22,21	2,29
	4,76	11,42	2,43
	3,36	9,01	2,73
	9,57	21,90	2,30
	4,59	11,30	2,51
	2,94	8,03	2,77

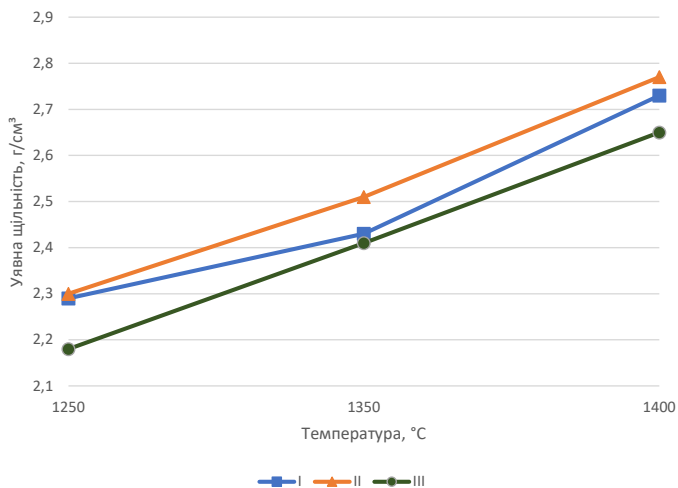
РПК-1 з 36 до 30 %, покращено його властивості шляхом одночасного додавання розріджуючої добавки Dolarix PC 67 та підігріву. Також при дослідженні впливу температури випалу на властивості зразків встановлено, що при температурі 1400 °С зразки характеризуються кращими фізико-механічними показниками. Використані технологічні прийоми (додавання Dolarix PC 67 та підйом температури випалу) дозволили знизити значення водопоглинання з 6,43 до 2,94 % та збільшити показники уявної густини з 2,65 до 2,77 г/см<sup>3</sup>. Однак, при підвищенні температури ливарного шлікера з 20 до 35 °С значення властивостей зразків практично не відрізняються один від одного.



*Рисунок 16. Залежність вогневої усадки від особливості виготовлення шлікера та температури випалу*



*Рисунок 17. Залежність водопоглинання від особливості виготовлення шлікера та температури випалу*



*Рисунок 18. Залежність уявної густини від особливості виготовлення шлікера та температури випалу*

В порівнянні отриманих показників властивостей з показниками кераміки створеної при використанні методу напівсухого пресування, необхідно відзначити підвищені показники водопоглинання та відкритої поруватості, а також низькі значення уявної густини, що свідчить про низьку щільність литої заготовки. В даному випадку необхідно додатково провести експеримент з підбору оптимальних технологічних параметрів: температури випалу, часу помелу синтезованого матеріалу та кількості розріджуючої добавки.

### **Оптимізація технологічних параметрів отриманої радіопрозорої кераміки**

Для проведення експерименту по встановленню кращих технологічних параметрів виготовлення виробів методом шлікерного лиття був застосований повно факторний експеримент типу  $2^3$ , факторами в якому виступали часу помелу, кількість розріджуючої добавки та температура випалу зразків.

Для уточнення експерименту було вирішено, центром плану обрати точку з наступними нульовими значеннями факторів: час помелу – 20 хвил.; кількість

розріджуючої добавки – 0,055 мас. %; температура випалу – 1300 °С. Інтервал варіювання часу помелу дорівнює 10 хвил., кількості розріджуючої добавки – 0,045 мас. %, температури випалу – 50 °С.

У відповідності до розробленого натурального плану експерименту (табл. 7) були отримані зразки, технологія їх отримання складається з класичних етапів. Помел синтезованої речовини проводився в планетарному млині з різним часом подрібнення, шлікер вологістю 32 % готували в шаровому млині з додаванням розріджуючої добавки. Заготовки для експериментальних досліджень, отримані методом лиття суспензії у гіпсові форми, висушували та випалювали за температур 1250 та 1350 С з витримкою за максимальної температури три години.

У табл. 7 наведено план-матрицю з натуральними значеннями факторів згідно з обраним інтервалом варіювання. В ході експерименту визначались наступні характеристики отриманих керамічних зразків: водопоглинання, уявна щільність та межа міцності при згині (табл. 8).

Отримані результати оброблені з використанням прикладної програми *Microsoft Excel*. Для кожної серії експерименту отримані рівняння третього порядку, що характеризують залежності:

- «кількість розріджуючої добавки – час помелу – температура випалу – водопоглинання»;
- «кількість розріджуючої добавки – час помелу – температура випалу – уявна щільність»;
- «кількість розріджуючої добавки – час помелу – температура випалу – міцність на згин».

Залежності з кодованими факторами мають вигляд:

$$W, \% = 4,49 - 1,35 \cdot x - 0,3 \cdot y - 3,9 \cdot z + 0,042 \cdot x \cdot y + 1,071 \cdot x \cdot z - 0,035 \cdot y \cdot z + 0,079 \cdot x \cdot y \cdot z$$

$$\rho, \text{г/см}^3 = 2,777 + 0,121 \cdot x + 0,124 \cdot y + 0,16 \cdot z + 0,015 \cdot y \cdot z + 0,024 \cdot x \cdot y \cdot z$$

$$\sigma_{зг}, \text{мПа} = 45,279 + 4,908 \cdot x + 3,947 \cdot y + 11,426 \cdot z - 0,044 \cdot x \cdot y - 0,547 \cdot x \cdot z + 2,81 \cdot y \cdot z + 0,071 \cdot x \cdot y \cdot z$$

Для рівнянь:

$$x = \frac{\text{Час помелу, хв} - 20}{10}$$

$$y = \frac{\text{Кількість розріджуючої добавки, мас. \%} - 0,055}{0,045}$$

$$z = \frac{\text{Температура випалу, } ^\circ\text{C} - 1300}{50}$$

Таблиця 7. План експерименту у натуральному вигляді

Шифр зразка в серії	Фактори в натуральному вигляді		
	Час помелу, хв	Кількість розріджуючої добавки, мас. %	Температура випалу, $^{\circ}\text{C}$
	<b>x</b>	<b>y</b>	<b>z</b>
РПК-1 – 8	30	0,1	1350
РПК-1 – 7	10	0,1	1350
РПК-1 – 6	30	0,01	1350
РПК-1 – 5	10	0,01	1350
РПК-1 – 4	30	0,1	1250
РПК-1 – 3	10	0,1	1250
РПК-1 – 2	30	0,01	1250
РПК-1 – 1	10	0,01	1250

Таблиця 8. Властивості експериментальних складів

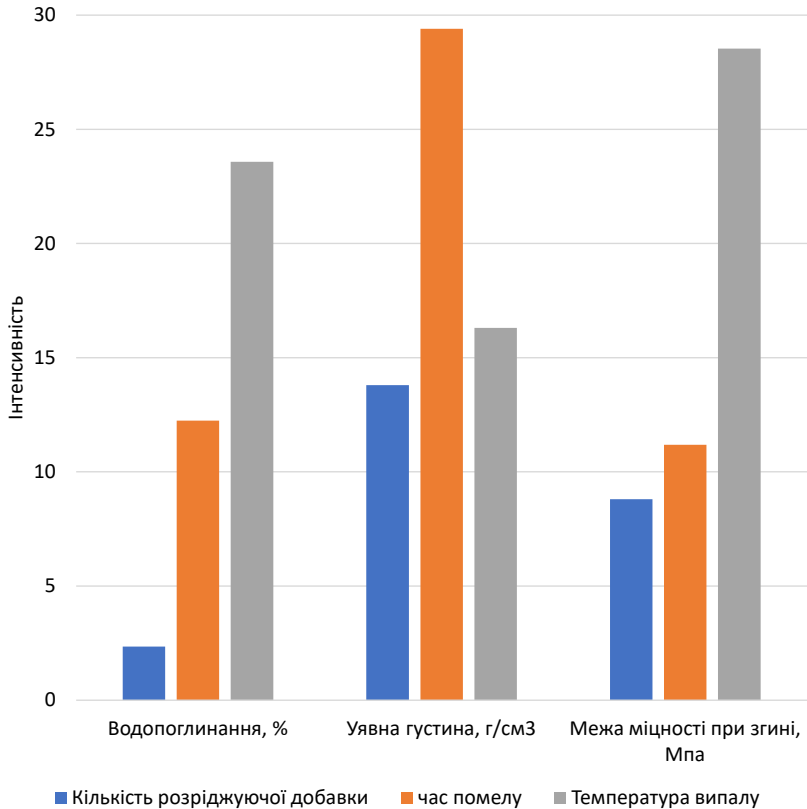
Шифр зразка в серії	Властивості зразків		
	Водопоглинання W, %	Уявна щільність $\rho$ , г/см <sup>3</sup>	Міцність при згині $\sigma$ , МПа
РПК-1 – 8	0,07	3,06	72,50
РПК-1 – 7	0,28	2,84	64,60
РПК-1 – 6	0,48	2,82	59,15
РПК-1 – 5	1,17	2,35	48,52
РПК-1 – 4	4,31	2,99	40,73
РПК-1 – 3	11,49	2,07	27,47
РПК-1 – 2	4,70	2,73	37,68
РПК-1 – 1	12,94	1,97	24,77

Аналіз отриманих рівнянь регресії дозволяє оцінити вплив технологічних параметрів отримання щільноспеченого керамічного матеріалу з високими характеристиками міцності. Так, вплив факторів на водопоглинання подібний: збільшення кількості розріджувача та часу помелу, а також підвищення температури випалу зменшують показники водопоглинання. Аналогічний вплив факторів і на уявну густину та межу міцності при стиску: збільшення значень факторів – покращують якість керамічного матеріалу.

Також слід відзначити різну вагу параметрів при дії на межу міцності при стиску, більш значущим параметром є температура спікання, це можна пояснити появою незначної кількості склофази в синтезованому матеріалі, що ще недостатньо різкого зменшує водопоглинання. Винятком, подібності дії факторів, є вплив часу помелу на уявну густину. В досліджуваному інтервалі технологічних параметрів час помелу має вдвічі вагомий вплив на уявну густину в порівнянні з впливом температури спікання. Для наочності на діаграмі (рис. 19) приведено значущість впливу параметрів на досліджувані властивості.

Використання отриманих моделей дозволяє з достатньою точністю

прогнозувати показники водопоглинання, уявної густини та міцності матеріалів, які виготовлятимуться з використанням обраного складу та за заданими технологічними параметрами.



*Рисунок 19. Порівняльна діаграма коефіцієнтів при окремих факторах в рівнянні «технологічні параметри – властивості»*

Для графічної інтерпретації отриманих даних, для граничних значень фактору температури випалу були побудовані діаграми з лініями рівних значень для показників водопоглинання, діелектричної проникності та міцності на згин (рис. 20-22).

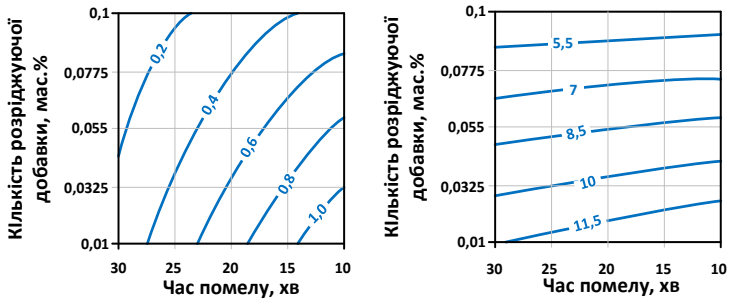


Рисунок 20. Залежність водопоглинання зразків випалених при температурах 1350 та 1250 °С від технологічних параметрів

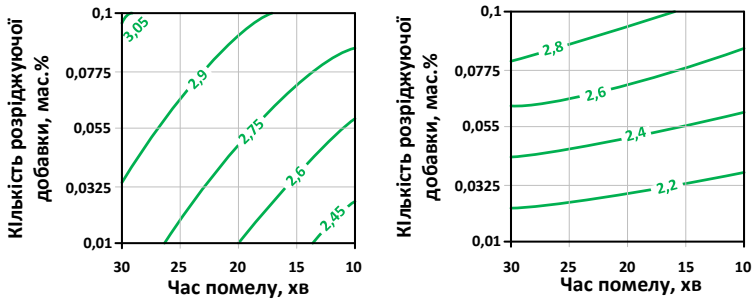


Рисунок 21. Залежність уявної густини зразків випалених при температурах 1350 та 1250 °С від технологічних параметрів

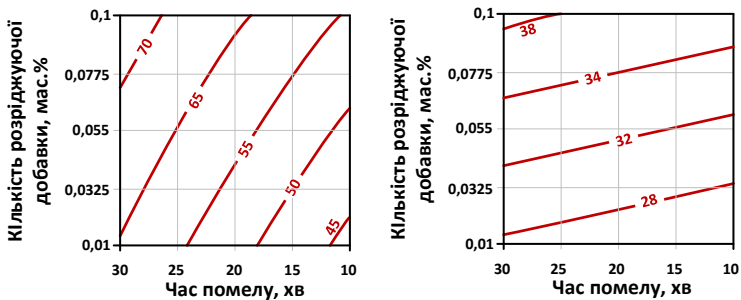


Рисунок 22. Залежність межі міцності при стиску зразків випалених при температурах 1350 та 1250 °С від технологічних параметрів

У результаті проведених досліджень, з використанням методу факторного планування експерименту, встановлено, що в досліджуваній області технологічних параметрів найкращих властивостей матеріал набуває при найвищих їх значеннях. А саме при вмісті 0,1 мас. % розріджуючої добавки, 30 хвилинах помелу синтезованої речовини та за температури випалу зразків 1350 °С створений матеріал характеризується наступними показниками: водопоглинання – 0,07 %, уявна щільність – 3,06 г/см<sup>3</sup> та межа міцності при згині – 72,50 МПа.

### **Розробка технології носових обтічників на основі твердого розчину барій-стронцієвого анортиту**

Даний опис технологічної схеми виробництва представляє основні процеси отримання носових обтічників для захисних елементів конструкцій літальних апаратів в умовах серійного виробництва КДНВП «Кварсит» з використанням наявного устаткування. Сировиною для отримання обтічників є оксид кремнію (IV) (чда), карбонат стронцію (чда), карбонат барію (ч), оксид алюмінію (чда), оксид стануму (чда), карбонат літію (ч) та добавка Dolapix PC 67.

Радіопрозорі обтічники на основі цельзіан-славсонітового складу виготовляли за наступною технологією: формування обтічників методом шлікерного лиття проводиться у гіпсові форми з металічною серцевиною на столі (ручний спосіб). Роз'єм гіпсових форм проводиться після набору міцності черепка. Сушку заготовок проводять у сушильній шафі протягом 3 годин за температури 110 °С з остаточною вологістю до 1 %. Випал заготовки для обтічника проводять у муфельній печі за температури 1350 °С з ізотермічною витримкою 2 години. Далі відбувається механічна обробка, раціоналаштування обтічника та подальші дослідження властивостей.

За результатами комплексу проведених досліджень розроблено технологічну схему виготовлення носових обтічників на основі цельзіан-славсонітової кераміки (рис. 23).

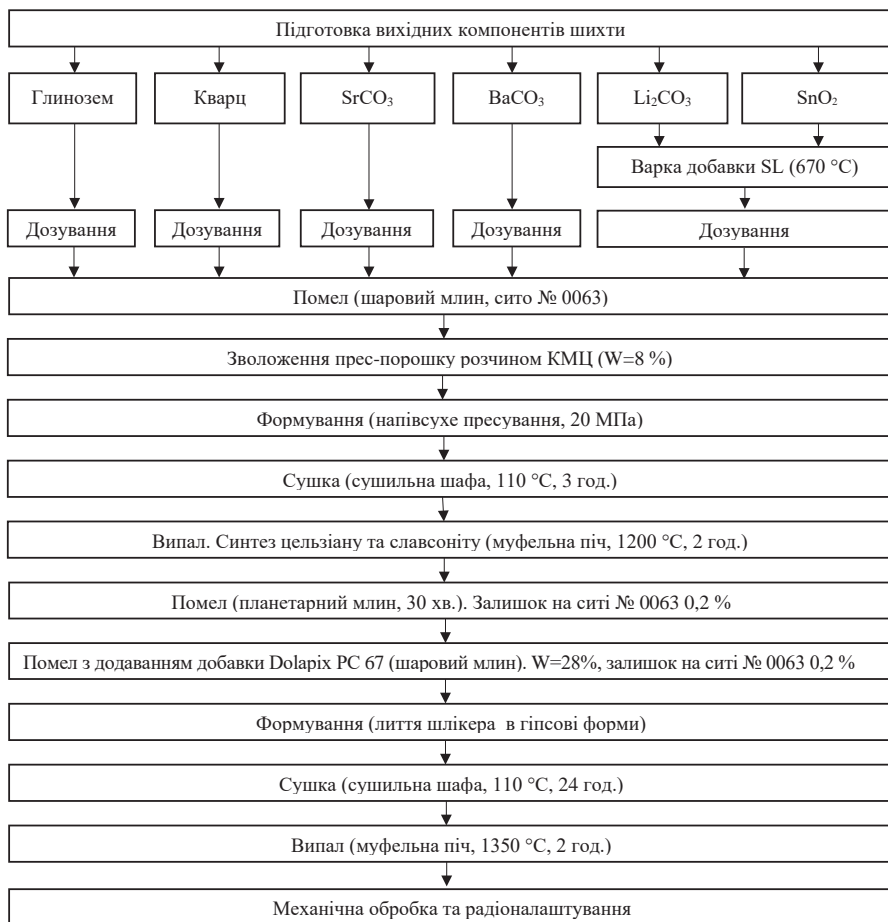


Рисунок 23. Технологічна схема виробництва цельзіан-славсонітової кераміки

## ВИСНОВКИ

Результати якісного рентгенофазового аналізу та електронної мікроскопії показали, що за температури випалу понад 1250 °С у всіх зразках присутня тільки фаза  $\text{Ba}_{0.25}\text{Sr}_{0.75}\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ , а структура зразків кераміки представлена барій-стронцієвим анортитом є однорідною, без дефектів і тріщин.

З використанням методу математичного планування (ПФЕ 2<sup>3</sup>), встановлено, що в досліджуваній області технологічних параметрів найкращих властивостей матеріал набуває при вмісті 0,1 мас. % добавки Dolapix PC 67, 30 хвилину помелу та за температури випалу 1350 °С. Створений матеріал характеризується наступними показниками: водопоглинання – 0,07 %, уявна щільність – 3,06 г/см<sup>3</sup> та межа міцності при згині – 72,50 МПа.

За результатами комплексних досліджень рекомендовано наступні технологічні параметри виробництва: випал на стадії синтезу за температури 1200 °С з 2-годинною витримкою; помел продуктів синтезу в шаровому млині до забезпечення залишку на ситі № 0063 не більше 1 % з додаванням 0,1 мас. % добавки Dolapix PC 67 та вологістю шлікера – 30 %. Лиття заготовок з шлікера у гіпсові форми; випал виробів за температури 1350 °С з 2 годинною витримкою.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Шнейдерман, Я. А. Новые материалы для антенных обтекателей сверхзвуковых самолетов и ракет / Я. А. Шнейдерман // *Зарубежная радиоэлектроника*. – 1971. – № 2. – С. 79-113.
2. Русин М. Ю. Опыт разработки головных обтекателей для летательных аппаратов / М. Ю. Русин, А. Г. Ромашин, П. И. Камнев // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2004. – № 5. – С. 63-69.
3. Ромашин А. Г. Радиопрозрачные обтекатели летательных аппаратов. Проектирование, конструкционные материалы, технология производства, испытания: Учеб. пособие / А. Г. Ромашин, В. Е. Гайдачук, Я. С. Карпов [и др.]. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т «ХАИ», 2003. – 239 с.

4. Гнесин Г.Г. Радиопрозрачные материалы // Неорганическое материало-ведение : Энциклопед. изд. в 2-х т. / под редакцией Г. Г. Гнесина, В. В. Скорохода. – Т. 2, кн. 2. – К. : Наук. думка, 2008. – С. 204–210.
5. Каплун В. А. Обтекатели антенн СВЧ / В.А. Каплун. – М. : Сов. радио, 1974. – 240 с.
6. Радиопрозрачные изделия из стеклопластиков / [И. Г. Гуртовник, В. И. Соколов, Н. Н. Трофимов, С. И. Шалгунов]. – М. : Мир, 2003. – 363 с.
7. Русин М. Ю. Проектирование головных обтекателей ракет из керамических и композиционных материалов : Учеб. Пособие / Русин М. Ю. – М. : МГТУ им. Баумана, 2005. – 64 с.
8. Пивинский Ю. Е. Кварцевая керамика / Ю. Е. Пивинский, А. Г. Ромашин. – М. : Металлургия, 1974. – 264 с.
9. Михеев С. В. Керамические и композиционные материалы в авиационной технике / С. В. Михеев, Г. Б. Строганов, А. Г. Ромашин. – М. : Альтекс, 2002. – 275 с.
10. Зайонц Р. М. Керамические химически стойкие изделия / Р. М. Зайонц, Р. К. Кондорская. – М. : Стройиздат, 1966. – 188 с.
11. Ботвинкин О. К. Лабораторный практикум по общей технологии силикатов и технологическому анализу строительных материалов / О. К. Ботвинкин М. : Стройиздат, 1966. – 395 с.
12. Исследование реологических свойств глиноземистых шликеров, содержащих новые диспергирующую и упрочняющую добавки / В. В. Мартыненко В. В. Примаченко Ю. Е. Мишнева [и др.] // ПАО «УКРНИ и огнеупоров им. А. С. Бережного». – 2016. – № 116. – С. 98 – 109.
13. Dolapix PC 67 [Электронный ресурс]// Zschimmer & Schwarz. – 2013. – Режим доступа до ресурсу: [http://www.interkeram.rs/pdf/1753642\\_Dolapix%20PC%2067.pdf](http://www.interkeram.rs/pdf/1753642_Dolapix%20PC%2067.pdf)  
American society for testing materials: Diffraction Data Cards and Alphabetical and Grouped Numerical Index of X-Ray Diffraction Data. – Philadelphia, 1977.

## ПЕРСПЕКТИВНІ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНІ СИСТЕМИ ДЛЯ ЛЕГКОБРОНЬОВАНОЇ ТЕХНІКИ

*Буряковський С. Г., Волонцевич Д. О., Любарський Б. Г., Тищенко А. А.*

### Вступ

#### Актуальність завдання

На рубежі тисячоліть практично всі світові лідери з розробки та виробництва бронетанкової техніки почали більш інтенсивно розвивати бронетехніку з колісним рушієм (рис. 1, 2), відмовляючись від широкого застосування більш важких, дорогих і менш мобільних в сучасних умовах гусеничних машин.



*Рисунок 1. Гібридний бронетранспортер VAB (Франція)*



*Рисунок 2. Гібридний бронев автомобіль Акреп II (Туреччина)*

У сучасній легкоброньованій техніці доцільно застосовувати декілька різних електромеханічних систем. Вони дозволяють підвищити динамічні показники шасі, його надійність та зменшити втрати пального. Сучасні підходи до проектування дають можливість інтегрувати ці системи у єдину, що керує роботою транспортного засобу в різних режимах. Розглянемо їх основні складові.

Перша – це електрична трансмісія на основі вентильно-індукторних тягових двигунів з накопичувачем енергії, яку апробовано при розробці тягових передач сучасних маневрових тепловозів.

Друга – перетворює енергію, яку генерують поршні ДВЗ безпосередньо в електричну. Це дає можливості застосувати в електричній передачі потужності енергетичну установку з інтегрованим у ДВЗ генератором, який значно зменшує габарити системи в цілому та підвищує надійність за рахунок значного зменшення вузлів і деталей.

Третя – дозволяє рекуперувати енергію коливань транспортного засобу в електричну завдяки застосуванню електромеханічних амортизаторів.

Електричні трансмісії останнім часом знаходять все більш широке поширення не тільки в цивільних автомобілях, але і у військовій техніці [1-9]. Прикладом може послужити гібридний броньований автомобіль «Шторм» та колісна броньована машина «Genesis», які представлені на рис. 3, 4.



*Рисунок 3. Гібридний броньований автомобіль "Шторм" (ОАЕ – Україна)*



*Рисунок 4. Колісна броньована машина Genesis з гібридним приводом (Німеччина)*

Це пов'язано з тим, що електричні трансмісії дозволяють забезпечити [10-11]:

- безступінчасту зміну швидкості і тягового зусилля при забезпеченні найбільш економічних режимів роботи ДВЗ;
- легкість автоматизації трансмісії і забезпечення управління машиною будь-яким членом екіпажу, а також дистанційного керування;
- розширені можливості по рекуперації енергії уповільнення, повороту, коливань підресорених мас і т. д.;
- можливість короткочасного руху без працюючого ДВЗ;
- можливість короткочасного підсумовування потужності генераторної установки і накопичувачів енергії;

- простоту реалізації системи підтримки курсової стійкості і регулювання тяги для виключення буксування;
- відсутність жорстких механічних зв'язків між основними агрегатами, що полегшує компоновку;
- високу блочну уніфікацію між машинами різних видів і класів;
- більш високу надійність за рахунок дублювання і швидкості заміни при пошкодженнях (для мотор-колес);
- можливість підвищити мінну стійкість корпусу і збільшити динамічний хід підвіски (для мотор-колес);
- можливість реалізації силового розвороту з мінімальним радіусом за рахунок обертання в протилежних напрямках коліс різних бортів (для індивідуального приводу ведучих коліс).

За два останніх десятиліття стався революційний стрибок у розвитку накопичувачів електроенергії, різко скоротилися габарити і вага керуючої апаратури, а також були створені тягові електродвигуни з показниками, що дозволяють на їх основі створити електричну трансмісію для колісних бронетранспортерів не тільки за мостовою схемою, але і за принципом мотор-колеса.

Крім того, класичні ступінчасті механічні трансмісії з гідродинамічними передачами практично повністю вибрали свій технічний потенціал щодо підвищення питомої потужності і рухливості повнопривідних машин і військової техніки (рис. 5).

Невиправдана складність реалізації на багатовісних повнопривідних машинах функцій системи підтримки курсової стійкості і регулювання тяги для виключення буксування без участі енергетично не вигідного використання гальмівної системи і АБС знижує їх функціональні можливості.

Все це зробило завдання проектування електромеханічних трансмісій для колісних бронетранспортерів і повнопривідних автомобілів багатоцільового призначення актуальним та своєчасним.



Рисунок 5. Гібридний бронетранспортер «Кримск» (Росія)

**Формалізація вимог до електричних трансмісій колісних бронетранспортерів і повнопривідних автомобілів багатocільового призначення**

Проілюструємо формалізацію вимог до електричних трансмісій на прикладі рухливості українського колісного бронетранспортера БТР-4. Вихідні дані для розрахунків представлені в табл. 1 [12, 13].

Для задоволення заданих параметрів рухливості були проведені розрахунки, що дозволяють визначити мінімально необхідну механічну потужність на ведучих колесах, яка забезпечує реалізацію кожного з параметрів.

Так для отримання потужності  $N_{v_{\max}}$ , що забезпечує максимальну швидкість руху  $V_{\max}$  по горизонтальних дорогах з різним коефіцієнтом опору руху  $f$  для колісної машини вагою  $G_M$  була побудована графічна залежність, представлена на рис. 6. Для її обчислення використовувалася формула з [14]:

$$N_{v_{\max}} = \frac{P_{v_{\max}} v_{\max}}{\eta_{KP}} = \frac{(G_M f + k F v_{\max}^2) v_{\max}}{\eta_{KP}}, \quad (1)$$

де  $k$  – коефіцієнт обтічності корпусу машини ( $k=0,65 \text{ Н}\cdot\text{с}^2/\text{м}^4$ );

$F$  – площа лобової проекції машини ( $F = 4,48 \text{ м}^2$ );

$\eta_{KP}$  – ККД планетарного колісного редуктора ( $\eta_{KP} \approx 0,97$ ).

Таблиця 1. Вихідні дані для розрахунків

Найменування показника		Значення
Вага машини $G_M$ , Н		245250
Колісна формула		8x8
Максимальна швидкість руху по шосе $V_{\max}$ , км/год		110
Середня швидкість руху, км/год	по шосе $V_{cp}$	60
	по ґрунтовій дорозі $V_{cp}^*$	45
Максимальний кут підйому по ґрунту $\alpha_{\max}^0$		30
Швидкість на підйом з ухилом $30^0$ не менше, км/год		5 (10)
Висота машини $H$ , м		2,36
Ширина колії $B$ , м		2,4
Кліренс $h$ , м		0,5
Статичний радіус колеса $R_{вк}$ , м		0,53
Коефіцієнт обтічності $k$ , ( $\text{Н}\cdot\text{с}^2$ )/ $\text{м}^4$		0,65
Розрахунковий час розгону по шосе, с (не більше)	до швидкості 30 км/год	5
	до швидкості 70 км/год	25
	до швидкості 110 км/год	75
Розрахункова кутова швидкість корпусу при розвороті машини на місці, ( $\text{с}^{-1}$ )		40
Максимальне значення динамічного фактора (не менше)		0,8

У нашому випадку для досягнення швидкості  $v_{\max} = 110 \text{ км/год}$  по дорозі з коефіцієнтом опору  $f = 0,02$  при вазі машини  $G_M = 245250 \text{ Н}$  на ведучих колесах необхідна потужність 240 кВт.

Витрати потужності для забезпечення середніх швидкостей руху по шосе становлять 98 кВт ( $f = 0,02$  і  $v_{CP} = 60 \text{ км/год}$ ), по ґрунтових дорогах 132 кВт ( $f = 0,04$  і  $v_{CP}^* = 45 \text{ км/год}$ ).

Для отримання потужності  $N_\alpha$ , що забезпечує рух на підйом під кутом  $\alpha = 30^\circ$  із заданою швидкістю руху  $v_\alpha$  по схилах з різним коефіцієнтом опору

руху  $f$  для колісної машини вагою, була побудована графічна залежність, представлена на рис. 7. Коефіцієнт зчеплення рушія з дорогою при цьому не аналізувався. Для її обчислення використовувалася формула з [14]:

$$N_{\alpha} = \frac{P_{\alpha} v_{\alpha}}{\eta_{KP}} = \frac{(G_M f \cos \alpha + G_M \sin \alpha + k F v_{\alpha}^2) v_{\alpha}}{\eta_{KP}}. \quad (2)$$

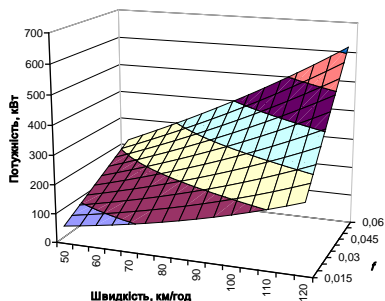


Рисунок 6. Залежність потужності приводу від максимальної швидкості і якості дороги

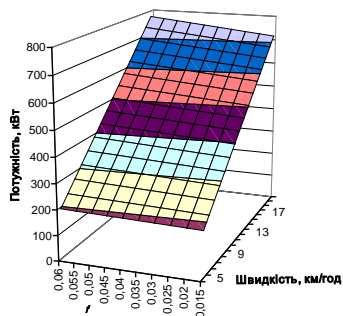


Рисунок 7. Залежність потужності приводу від швидкості руху на схил в 30° і якості дороги

У нашому випадку для досягнення швидкості  $v_{\alpha} = 5$  км/год по дорозі з коефіцієнтом опору  $f = 0,04$  при вазі машини  $G_M = 245250$  Н необхідна потужність  $N_{v_{\max}} = 188$  кВт, а для швидкості  $v_{\alpha} = 10$  км/год  $N_{v_{\max}} = 376$  кВт.

Для отримання потужностей  $N_i$ , що забезпечують розгін бронетранспортера до заданих швидкостей  $v_i$  по шосе ( $f = 0,02$ ) і сухий грейдерного ґрунтовій дорозі ( $f = 0,04$ ) були побудовані графіки залежності часу розгону від швидкості, що досягається, і сумарної потужності (рис. 8 і 9). Розрахунок розгінних характеристик і побудова графіків проводилося за методикою [14] з урахуванням збереження постійної потужності приводу у всьому швидкісному діапазоні з обмеженням за коефіцієнтом зчеплення колісного рушія з дорогою:  $\varphi = 0,8$  для шосе і  $\varphi = 0,5$  для ґрунтової дороги.

У нашому випадку для досягнення швидкості  $v_1 = 30$  км/год за час менше, ніж 5 с при русі машини вагою  $G_M = 245250$  Н по шосе з коефіцієнтом опору  $f = 0,02$  необхідна потужність не менше 260 кВт.

Для досягнення швидкості  $v_2 = 70$  км/год в аналогічних умовах за час менше, ніж 25 с необхідна потужність не менше 300 кВт.

Для досягнення швидкості  $v_3 = 110$  км/год в аналогічних умовах за час менше, ніж 75 с необхідна потужність не менше 340 кВт.

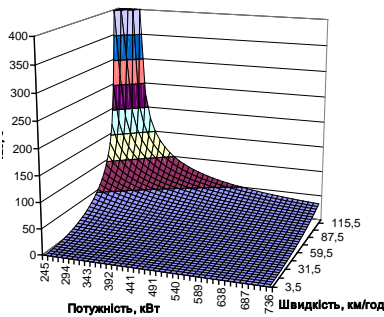


Рисунок 8. Залежність часу розгону від швидкості і потужності приводу для шосе

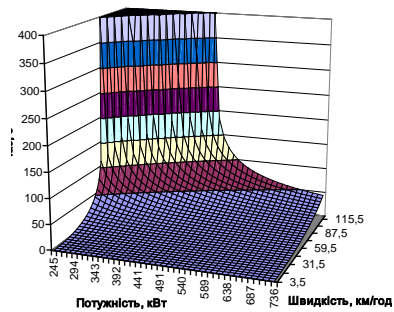


Рисунок 9. Залежність часу розгону від швидкості і потужності приводу для ґрунтової дороги

Для забезпечення кутової швидкості розвороту на місці з  $\omega_{пов}^{max} = 40$  °/с необхідна потужність, що обчислюється за формулою:

$$N_{v_{max}} = \frac{P_{max} v_{пов}}{\eta_{KP}} = \frac{G_M \varphi \omega_{пов}^{max} B}{2\eta_{KP}}, \quad (3)$$

де  $\varphi = 0,8$  – коефіцієнт зчеплення колісного рушія з асфальтом;

$B = 2,4$  м – ширина колії машини.

Обчислена потужність становить 170 кВт.

Узагальнені результати оцінки необхідної сумарної механічної потужності тягових електродвигунів наведені в табл. 2.

Однак, як вже було сказано в короткому аналізі проблеми, електродвигуни на своїй зовнішній характеристиці в зоні малих швидкостей мають горизонтальну полицю по крутному моменту, пов'язану з обмеженнями по силі струму в обмотках. Це призводить до того, що при малих швидкостях обертання ротора електромотора він не може видавати номінальну потужність через обмеження по крутному моменту.

Таблиця 2. Узагальнені результати розрахунків

Параметр	Потрібна потужність, кВт	Прийнята потужність, кВт	Теоретично очікувані значення параметра
$v_{\max} = 110$ км/год	240	340	$> 120$ км/год; 110 км/ч при $f=0,032$
$v_{\alpha} = 5(10)$ км/год	188 (376)		$v_{\alpha} = 9$ км/год
$v_1$ за 5 с	260		за 3,5 с
$v_2$ за 25 с	300		за 21 с
$v_3$ за 75 с	340		за 75 с
$\omega_{\text{пов}}^{\max}$	170		40 □с

Тому можна сформулювати вимогу до тягових електродвигунів щодо коефіцієнта пристосованості по крутному моменту. Так для бронетранспортера БТР-4 максимальна сила тяги при мінімальній швидкості повинна становити  $P_{\alpha} = G_M f \cos \alpha + G_M \sin \alpha + kFv_{\alpha}^2 = 132$  кН. А мінімальна сила тяги при максимальній швидкості руху  $P_{v_{\max}} = G_M f + kFv_{\max}^2 \approx 8$  кН.

Відповідно для тривалих режимів у електродвигунів повинен відпрацюватися коефіцієнт пристосованості по крутному моменту, що

$$\text{дорівнює } k_M = \frac{M_{\max}}{M_{\text{ном}}} = \frac{132}{8} = 16,5.$$

Одночасно для впевненого подолання штучних перешкод на малих швидкостях необхідний динамічний фактор не менше 0,8. Відповідно,

електродвигуни повинні забезпечити короточасний коефіцієнт пристосованості приводу по крутному моменту  $k_M^{\max} = \frac{\varphi_{\max}}{f_{\min}} = \frac{0,8}{0,02} = 40$ .

Для пропонуванних на ринку електродвигунів такі показники на даний момент недосяжні, тому для військової техніки зазвичай весь силовий діапазон розбивають на дві або три ділянки, які відпрацьовуються за рахунок різних передавальних відношень механічних редукторів, і використовують окремо режими для доріг з твердим покриттям і для складних ділянок місцевості та бездоріжжя.

Таким чином, для реалізації заданих характеристик рухливості колісного бронетранспортера БТР-4 під час переходу на електромеханічну трансмісію без урахування обмеження в електродвигуні крутного моменту за величиною сили струму в обмотках достатньо забезпечити на кожному колесі механічну потужність не менше 42,5 кВт. Також для реалізації заданих характеристик рухливості колісного бронетранспортера БТР-4 при одноступінчатих колісних редукторах необхідно забезпечити тривалий коефіцієнт пристосованості по крутному моменту  $k_M = 16,5$  і короточасний (до 2 хв.)  $k_M^{\max} = 40$ .

У свою чергу, можна виділити ще один важливий аспект – розробка комплексного підходу питання підвищення енергоефективності тягової передачі бронетанкової техніки.

### **Заходи з підвищення енергоефективності ДВЗ**

Вдосконаленням дизельних двигунів з метою поліпшення їх техніко-економічних показників займаються різні організації, результати їх досліджень відображені у численних публікаціях [15]. Пропонуються різні принципи і напрямки, конструктивні і технологічні рішення. Разом з тим наявність великої кількості різних шляхів вдосконалення дизелів в даний час ускладнює вибір раціональних рішень, прийнятних для широкого впровадження на машинобудівних заводах.

Одним з основних параметрів, що характеризують дизельний двигун

в цілому, є його ефективна потужність, тому провідні виробники транспортних ДВЗ прагнуть постійно підвищувати цей показник. Причому простежується тенденція збільшення потужності без збільшення масогабаритних показників двигуна, що особливо важливо для транспортних ДВЗ [16].

На ефективну потужність двигуна впливають такі параметри: діаметр циліндра, хід поршня, коефіцієнт тактності, частота обертання колінчастого вала, кількість циліндрів, середній ефективний тиск.

Одним з основних способів збільшення ефективної потужності без зміни масогабаритних показників є збільшення середнього ефективного тиску в циліндрі дизеля, що може бути досягнуто шляхом збільшення тиску перед впускними органами двигуна, тобто тиску наддуву.

У системах газотурбінного наддуву дизелів вітчизняного виробництва в більшості випадків використовується один турбокомпресор високої продуктивності. Однак схема турбонадува з одним працюючим турбокомпресором має ряд істотних недоліків: вузький діапазон частот обертання колінчастого вала, що відповідає ефективній роботі турбокомпресора; значне зниження крутного моменту при роботі на малих частотах обертання.

Розглянемо комплекс заходів з підвищення ефективності електричної частини тягової передачі. На існуючих зразках бронетанкової техніки з електричною передачею тяговий (головний) генератор перетворює механічну енергію ДВЗ в електричну для живлення електродвигунів. Отриману від тягового генератора електричну енергію електродвигуни знову перетворюють в механічну енергію і приводять в обертання ходову частину бронетанкової техніки. Виходячи з вищесказаного, можна визначити шлях підвищення ефективності тягової електричної передачі – модернізація електричної частини. В рамках даного напрямку проводяться численні дослідження, які спрямовані, в основному, на застосування більш ефективних електричних машин, інтелектуальних систем керування або розробку гібридних систем.

Одним із способів підвищення енергоефективності є застосування тягової електричної передачі змінного струму, що має на увазі встановлення тягового

генератора і тягових електродвигунів змінного струму. Застосування тягової електричної передачі змінного струму дозволяє підвищити енергоефективність в тяговому режимі, але це рішення не дозволяє розкрити весь можливий потенціал підвищення енергоефективності електричної передачі.

Найбільш перспективним напрямком розвитку бронетанкової техніки в світі є розробка гібридних систем з накопичувачами енергії, що дозволяє зменшити потужність дизельної установки. Світовий досвід показує, що цей захід дає змогу знизити споживання пального на 50-60 %.

Приклад перспективної системи, яка дозволяє значно підвищити ефективність електричної частини тягової передачі, є гібридна система з передачею змінного струму, яка наведена на рис. 10.



*Рисунок 10. Машина з перспективним гібридним електричним приводом*

У той же час, домогтися ще більшого підвищення ККД системи можна, застосувавши комплексний підхід, який передбачає зміну конструкції як ДВЗ, так і електричної частини.

Відомо, що хімічна енергія палива у ДВЗ витрачається не тільки на виконання корисної роботи, а й на подолання паразитних сил, що виникають у двигуні. Розподіл енергії вибуху пального в дизельному ДВЗ представлено на рис. 11.

Згідно рис. 11, на виконання корисної роботи дизельним ДВЗ припадає близько 40 %, тому, зменшивши втрати в двигуні, можна значно підвищити його ефективність.



Рисунок 11. Розподіл енергії вибуху пального у ДВЗ

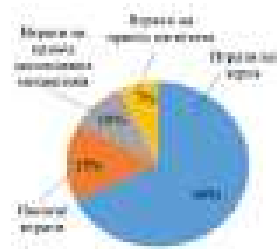


Рисунок 12. Розподіл втрат у ДВЗ

Всі втрати в ДВЗ можна умовно розділити на механічні, паливні та теплові. Паливні втрати обумовлені тим, що не все паливе згорає, а невелика його частина йде з відпрацьованими газами. Теплові втрати обумовлені тим, що двигун прогріває себе і безліч інших елементів, такі як радіатори, свій корпус, рідина яка в ньому циркулює і т.д., а також частина тепла йде з вихлопними газами. Механічні втрати виникають при подоланні сил тертя різних частин ДВЗ, а також на приведення до руху допоміжних механізмів, що забезпечують роботу двигуна.

Механічні втрати, в свою чергу, умовно діляться на втрати на тертя, насосні втрати, втрати на привід допоміжних механізмів, втрати на привід нагнітача, що представлено на рис. 12.

Як видно з рис. 12, на тертя доводиться 68 % всіх механічних втрат у ДВЗ. В свою чергу, розподіл втрат на тертя наведений на рис. 13.

Частка втрат на тертя підшипників колінчастого валу складає 35 % від загальних втрат на тертя. Застосування нових конструкцій ДВЗ без колінчастого валу дає значний простір для реалізації заходів щодо підвищення ефективності тягової електричної передачі ходової частини.

Одним із прикладів ДВЗ без колінчастого валу є вільнопоршневий двигун, який представлений на рис. 14.



Рисунок 13. Розподіл втрат у ДВЗ

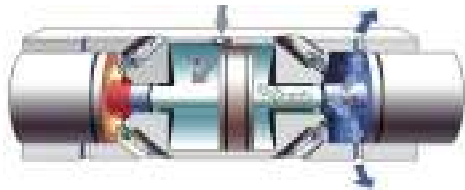


Рисунок 14. Загальний вид одного з варіантів вільнопоршневого ДВЗ

У вільнопоршневому двигуні рух поршня не обмежується наявністю жорсткого зв'язку з колінчастим валом.

Вільнопоршневий двигун складається з двох основних компонентів: вільнопоршневих ДВЗ і лінійного генератора.

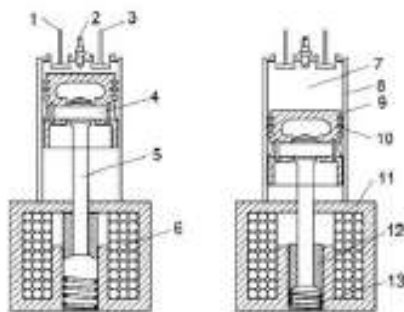
На відміну від традиційних ДВЗ з колінчастим валом, поршні вільнопоршневого двигуна вільно переміщуються в циліндрі, що дозволяє змінювати коефіцієнт стиснення і оптимізувати процес згорання. Змінюючи коефіцієнт стиснення, даний тип двигунів може працювати з гомогенним зарядовим займанням, що дозволяє збільшити його теплову ефективність і скоротити кількість викидів шкідливих речовин в атмосферу.

Двигун з вільним поршнем більш простий конструктивно, що знижує виробничі витрати, в порівнянні з ДВЗ з колінчастим валом. Відсутність колінчастого вала скорочує втрати на тертя, а рух вільного поршня може здійснюватися з великим прискоренням. Згідно [17], пікове прискорення поршня в вільнопоршневому двигуні приблизно на 60 % вище, ніж в звичайному двигуні, і вільнопоршневий двигун менше часу працює в зоні верхньої мертвої точки, де тиск газу і температура є найвищими. Отже, втрати тепла в циліндрі вільнопоршневого двигуна менше, ніж у звичайного двигуна.

Використання такої передачі має на увазі наявність бортового накопичувача енергії у вигляді акумуляторної, конденсаторної або інших типів

батареї. Це дає можливість знизити потужність силової установки і використовувати накопичену в батареях енергію. Незважаючи на більш високу ефективність такої передачі в порівнянні з традиційною, невирішеним залишається питання низької ефективності силової установки. Виходячи з цього, одним із способів підвищення ККД таких систем є використання двигуна з вільним поршнем. З огляду на те, що такий силовий агрегат складається з незалежних модулів-генераторів, він характеризується поштовховим режимом роботи. Дана особливість нівелюється зміщенням циклів роботи модулів щодо один одного і роботою їх на загальний накопичувач енергії. Ґрунтуючись на вищесказаному, інтеграція вільнопоршневого ДВЗ з лінійним генератором в гібридну тягову електричну передачу не викличе додаткового ускладнення системи, але дасть можливість підвищити ККД силової установки.

Конструкція вільнопоршневого двигуна для гібридного бронеавтомобіля наведена на рис. 15.



*Рисунок 15. Конструкція вільнопоршневого двигуна: 1 – впускні клапани, 2 – свічка накали, 3 – випускні клапани, 4 – поршневий палець, 5 – шток, 6 – котушка, 7 – камера згоряння, 8 – циліндр, 9 – поршень, 10 – поршневі кільця, 11 – статор, 12 – якор, 13 – пружина*

Лінійний генератор (рис. 15) у вигляді електромагніту містить котушку 6, якор 12 і статор 11. Генератор має два основних положення узгоджене і неузгоджене, з'єднання якоря зі штоком виконано таким чином, щоб при

знаходженні поршня у верхній мертвій точці, якір був в узгодженому стані. Використання двотактного двигуна внутрішнього згорання передбачає виконання ним двох ходів поршня, при яких відбувається наповнення циліндра і стиснення паливно-повітряної суміші, робочий хід поршня і випуск відпрацьованих газів. Основним є робочий хід поршня. Під час робочого ходу поршня генератор виробляє електричну енергію, яка акумулюється в накопичувачі. Як накопичувач можуть бути використані акумуляторна або суперконденсаторна батарея і їх комбінація. Під час стиснення паливно-повітряної суміші генератор працює в режимі двигуна і переміщує поршень. У конструкції передбачено застосування пружини 13, яка служить для збільшення сили, що розвивається електромагнітом на початку такту стиснення.

Для дослідження роботи такої системи була розроблена імітаційна модель роботи вільнопоршневого двигуна.

Робота лінійного електромеханічного перетворювача (ЕМП) електромагнітного типу описується наступною системою рівнянь:

$$\begin{cases} \frac{di}{dt} = \frac{1}{\frac{\partial \psi(i,x)}{\partial i}} \cdot \left[ E - ri - \frac{\partial \psi(i,x)}{\partial x} v \right] \\ \frac{dv}{dt} = \frac{F_{ел} + F_{пр} - F_o}{m} \\ \frac{dx}{dt} = v \end{cases} \quad (4)$$

де  $i$  – струм обмотки статора;

$\psi$  – потокозчеплення обмотки;

$E$  – напруга джерела живлення;

$r$  – опір обмотки;

$x$  – переміщення якоря;

$v$  – швидкість;

$F_{ел}$  – електромагнітна сила;

$F_{пр}$  – сила пружини;

$F_o$  – сила опору,

$m$  – маса рухомих частин генератора та вільнопоршневого ДВЗ.

У лінійному ЕМП електромагнітного типу розвивається сила і потокозчеплення обмотки є величинами, які залежать від переміщення якоря. Для визначення цих залежностей був проведений розрахунок даних параметрів в програмному комплексі FEMM [18]. В даному комплексі розрахунок проводиться методом кінцевих елементів, при цьому розрахункова зона розбивається на елементарні трикутні зони. Розрахункова зона і розподіл магнітного поля в статорі і якорі електромагніта представлені на рис. 16.

За допомогою підпрограми написаної в текстовому файлі на мові Lua був автоматизований процес розрахунку. Граничними умовами, при цьому, є переміщення якоря щодо статора – від узгодженого до неузгодженого, яке становить 315 мм, а також допустиме значення МДС на рівні 40000 А.

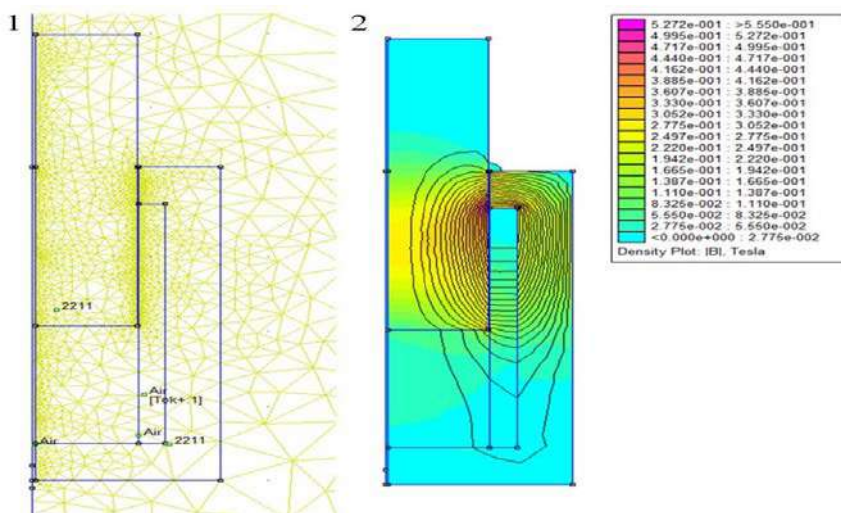


Рисунок 16. Розрахункова зона (1) і розподіл магнітної індукції в генераторі (2)

Результатом розрахунку є отримані значення потокозчеплення і сили, яка реалізується магнітом, при різних значеннях переміщення і МДС якорної обмотки, які представлені на рис. 17 і 18.

Для отримання безперервних залежностей потокозчеплення результати цифрового моделювання були апроксимовані безперервними функціями. При

виборі типу функції вирішувалися наступні завдання:

– функція і її похідні по переміщенню якоря на початку і кінці інтервалу, на якому проводиться апроксимація, повинні бути однаковими;

– запропонована функція повинна мати досить простий вигляд аналітичних приватних похідних по всіх координатах.

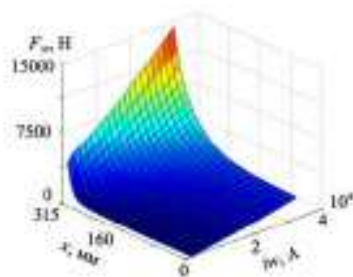
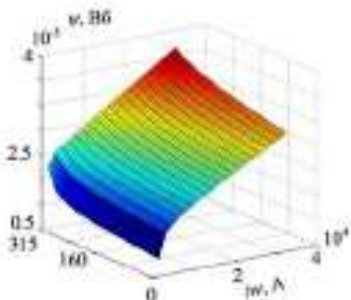


Рисунок 17. Значення потокозчеплення, Рисунок 18. Значення сили, отримані в результаті розрахунку

З огляду на вище сказане, запропонована функція виду:

$$f(i, x) = \sum_{l=1}^m [(\sum_{h=0}^n aa_h \cdot i^h) \cos(lx) + (\sum_{h=0}^n bb_h \cdot i^h) \sin(lx)] + \sum_{h=0}^n cc_h \cdot i^h \quad (5)$$

де  $aa_h, bb_h, cc_h$  – коефіцієнти полінома;

$l$  – номер гармоніки.

Для визначення коефіцієнтів полінома використаний метод на основі поліномів Чебишева на безлічі рівновіддалених точок [19].

Зниження порядку математичної моделі без обмеження можна отримати, якщо визначати силу за результатами розрахунку магнітного поля методом кінцевих елементів (за допомогою програми FEMM [18]), а потім апроксимувати її в поліном виду:

$$F_e(i, x) = \sum_{j=0}^{JF} \sum_{k=0}^{KF} (ma_{jk} (MJF \cdot i + ZJF)^j (MKF \cdot x + ZKF)^k) \quad (6)$$

де  $ma_{jk}$  – коефіцієнти полінома визначені методом Чебишева;

$MJF, MKF$  – масштабні коефіцієнти по току и зазору – відповідно;

$ZJF, ZKF$  – зміщення по току і зазору – відповідно;

$J, K$  – ступеня апроксимирующего полінома по току і зазору – відповідно.

Поліном, що описує функцію потокозчеплення обмотки статора, має вигляд:

$$\psi(i, x) = w \sum_{j=0}^J \sum_{k=0}^K (aa_{jk} (MJ \cdot i + ZJ)^j (MK \cdot x + ZK)^k) \quad (7)$$

де  $aa_{jk}$  – коефіцієнти полінома для обмотки, визначені з використанням поліномів Чебишева;

$w$  – кількість витків обмотки;

$MJ, MK$  – масштабні коефіцієнти по току і зазору – відповідно;

$ZJ, ZK$  – зміщення по току і зазору – відповідно.

Для створення імітаційної моделі складені функціональні схеми вільнопоршневого двигуна, які наведені на рис. 19 і 20.

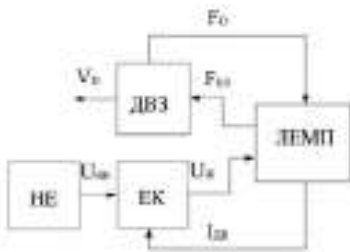


Рисунок 19. Функціональна схема роботи вільнопоршневого двигуна в режимі стиснення: ЕК – електронний комутатор, ЛЕМП – лінійний електромеханічний перетворювач,  $U_{не}$  – напруга живлення ЕК від НЕ,  $U_{ж}$  – напруга живлення якірної обмотки,  $I_{дв}$  – струм двигуна,  $F_{ел}$  – електромагнітна сила,  $F_0$  – сила опору ДВЗ,  $V_n$  – швидкість поршня

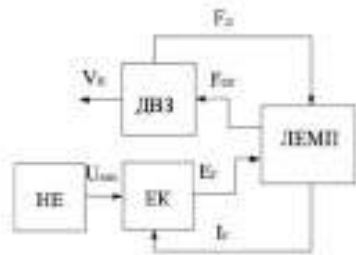


Рисунок 20. Функціональна схема роботи вільнопоршневого двигуна в режимі робочого ходу: НЕ – накопичувач енергії, ДВЗ – двигун внутрішнього згоряння,  $U_{вих}$  – вихідна напруга ЕК для зарядки НЕ,  $E_{г}$  – ЕРС генератора,  $I_{г}$  – струм генератора,  $F_{ог}$  – сила опору генератора,  $F_{д}$  – сила, створювана робочими газами дизеля

На основі функціональних схем (рис. 19, 20) і системи рівнянь (4) складена структурна схема моделі роботи вільнопоршневого двигуна з ЛЕМП (рис. 21).

На основі структурної схеми розроблена імітаційна модель роботи вільнопоршневого двигуна. Моделювання проводилося в середовищі Matlab. В основу моделі ДВЗ покладена діаграма його роботи, апроксимована поліномами. Модель ЛЕМП побудована на основі системи рівнянь (4). Електронний комутатор включає в себе 2 транзистора і 2 зворотних діода, моделі, яких було взято з розділу SimPowerSystems. У руховому режимі живлення обмотки здійснюється через транзистори, а в генераторному струм протікає через діоди. Як накопичувач енергії використаний конденсатор, який заряджається від ЕМП в генераторному режимі і живить його в руховому.

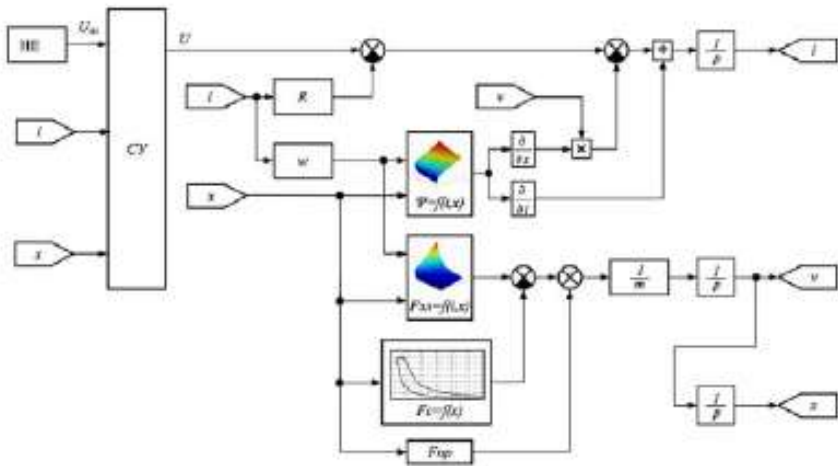


Рисунок 21. Структурна схема моделі роботи вільнопоршневого двигуна

У результаті моделювання отримані осцилограми сил одного модуль-генератора, який включає в себе один циліндр дизеля K6S310DR і один лінійний генератор (рис. 22).

Різниця значень напруги на конденсаторі спочатку і в кінці циклу склала 34 В, середня швидкість руху поршня дорівнює 10 м/с. Ґрунтуючись на

отриманій діаграмі (рис. 22), відповідно до формул (9) і (10) обчислені корисні потужності циліндра ДВЗ і лінійного генератора:

$$P_{\text{диз}} = \int_{x_{\min}}^{x_{\max}} F_{\text{роз}}(x)dx - \int_{x_{\min}}^{x_{\max}} F_{\text{ст}}(x)dx \quad (9)$$

де  $x_{\min}$  – мінімальне переміщення поршня;

$x_{\max}$  – максимальне переміщення поршня;

$F_{\text{роз}}$  – сила, що розвивається ДВЗ під час такту розширення;

$F_{\text{ст}}$  – сила, необхідна для стиснення паливно-повітряної суміші.

$$P_{\text{ген}} = \int_{x_{\min}}^{x_{\max}} F_{\text{ген}}(x)dx - \int_{x_{\min}}^{x_{\max}} F_{\text{рух}}(x)dx \quad (10)$$

де  $F_{\text{ген}}$  – сила, що розвивається ЕМП під час такту генерування енергії;

$F_{\text{рух}}$  – сила, що розвивається ЕМП в руховому режимі.

Для дизельного двигуна внутрішнього згорання корисна потужність склала 207,6 кВт, а для лінійного генератора – 152,3 кВт.

Коефіцієнт повноти використання потужності дизельного ДВЗ, який дорівнює відношенню потужності генератора до потужності дизеля, склав 73,36 %. У той же час, невикористана генератором енергія вибуху палива накопичується в пружині, яка дозволяє збільшити пускову силу ЕМП в руховому режимі.

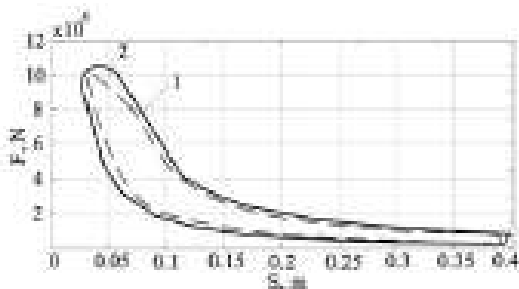
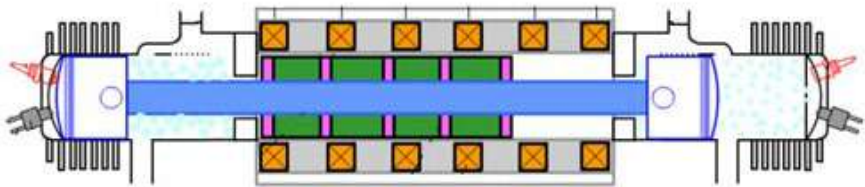


Рисунок 22. Результати моделювання роботи вільнопоршневого двигуна:

1 – сила, що розвивається ДВЗ, 2 – сила, що розвивається лінійним ЕМП

3 отриманих результатів зрозуміло, що найбільш перспективним

напрямок є застосування вільнопоршневих ДВЗ з лінійними генераторами у якості джерела електричної енергії, виключивши перетворення поступального руху в обертальний, що веде до збільшення загального ККД системи [20]. У той самий час, використання системи з накопичувачами енергії дає змогу не тільки більш ефективно експлуатувати силову установку, а й використовувати енергію рекуперативного гальмування, що також підвищує ефективність. Приклад вільнопоршневого двигуна суміщеного типу з лінійним двигун-генератором, аналогічного за конструкцією тому, що показаний на рис. 14 наведено на рис. 23.



*Рисунок 23. Вільнопоршневий ДВЗ з лінійним генератором*

Ще одним важливим кроком підвищення енергоефективності та надійності тягової силової установки є використання вентильно-індукторного двигуна (ВІД) в якості тягового. Цей тип двигунів найдешевший у виробництві та експлуатації, але має неперевершені електромеханічні властивості. Для перевірки доцільності його використання було проведено імітаційне моделювання. ВІД відноситься до класу синхронних реактивних машин з вентильним керуванням і представляє собою сукупність електромеханічного перетворювача енергії – індукторної машини (рис. 24) і електронного блоку керування. Необхідними частинами блоку керування є:

- блок керування (БК) комутацією, що містить алгоритм і систему керування електронним комутатором;
- датчики положення ротора (ДПР) й струму фази, які можуть виконуватися інтегрованими із блоком керування;
- електронний комутатор (ЕК), що забезпечує підключення обмоток індукторної машини до джерела живлення.

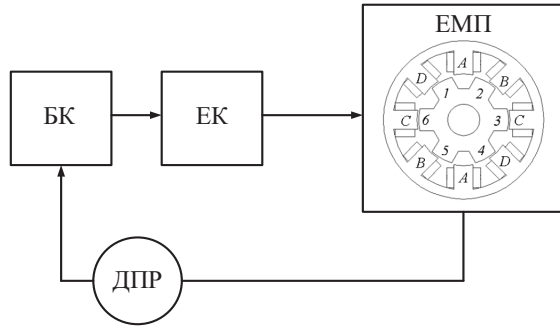


Рисунок 24. Функціональна схема ВІД

Принцип дії ВІД заснований на реактивній взаємодії зубців статора й ротора. Зубці ротора, під дією струму, що протікає в котушках фази, намагаються зайняти положення, що відповідає найбільшому значенню енергії магнітного поля, що відповідає режиму двигуна (рис. 25). Потокозчеплення котушок залежать від взаємного кутового положення зубців статора й ротора і струму котушок [21].

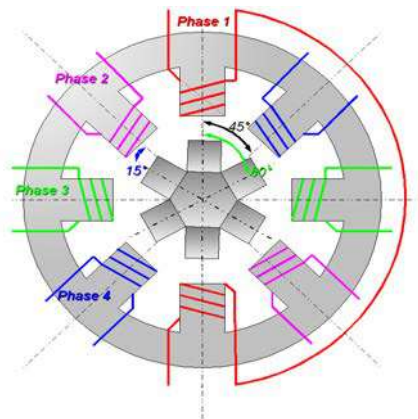


Рисунок 25. Чотирифазний ВІД конфігурації 8/6

Використовуючи рівняння Лагранжа для такого ЕМП отримуємо систему диференціальних рівнянь

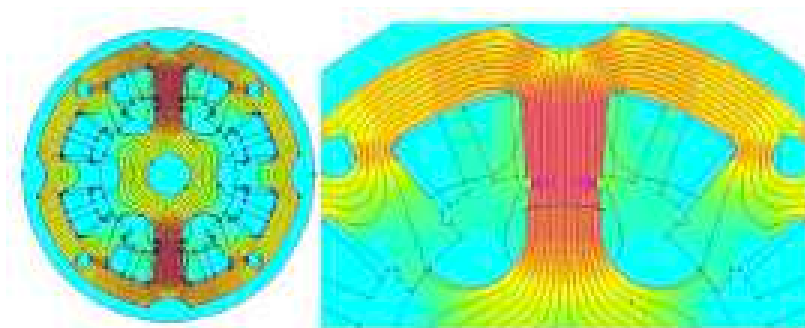
$$\left\{ \begin{array}{l}
 \frac{di_A}{dt} = \frac{1}{\frac{\partial \Psi_A(i_A, \theta)}{\partial i_A}} \left( e_A - r_A i_A - \frac{\partial \Psi_A(i_A, \theta)}{\partial \theta} \cdot \omega \right) \\
 \frac{di_B}{dt} = \frac{1}{\frac{\partial \Psi_B(i_B, \theta)}{\partial i_B}} \left( e_B - r_B i_B - \frac{\partial \Psi_B(i_B, \theta)}{\partial \theta} \cdot \omega \right) \\
 \frac{di_C}{dt} = \frac{1}{\frac{\partial \Psi_C(i_C, \theta)}{\partial i_C}} \left( e_C - r_C i_C - \frac{\partial \Psi_C(i_C, \theta)}{\partial \theta} \cdot \omega \right) \\
 \frac{di_D}{dt} = \frac{1}{\frac{\partial \Psi_D(i_D, \theta)}{\partial i_D}} \left( e_D - r_D i_D - \frac{\partial \Psi_D(i_D, \theta)}{\partial \theta} \cdot \omega \right) \\
 M_{\text{оє}} = f(i_A, i_B, i_C, i_D, \theta) \\
 \frac{d\omega}{dt} = \frac{M_{\text{оє}} - M_c}{J} \\
 \frac{d\theta}{dt} = \omega
 \end{array} \right. \quad (11)$$

де  $i_A, i_B, i_C, i_D$  – струми відповідних фаз статора;  
 $\Psi_A, \Psi_B, \Psi_C, \Psi_D$  – потокозчеплення відповідних фаз;  
 $e_A, e_B, e_C, e_D$  – напруга джерел живлення;  
 $\theta$  – кут повороту ротора;  
 $\omega$  – кутова швидкість;  
 $M_{\text{оє}}$  – рушійний момент;  
 $M_c$  – момент опору;  
 $J$  – момент інерції ротора.

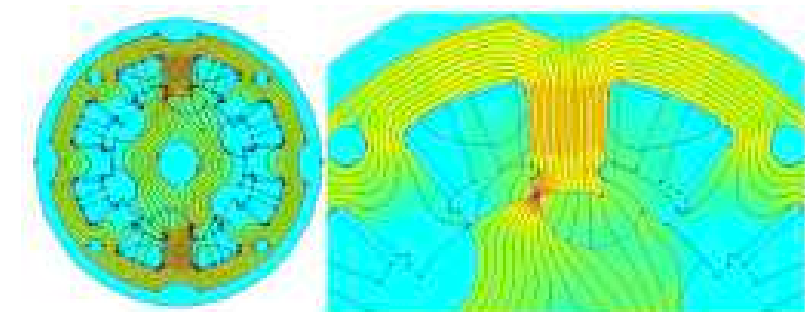
У постпроцесорі FEMM для розрахункової моделі ВІД задаємося збуджуючим впливом шляхом завдання величини струму котушки, намотаної на зубець статора. Також приймаємо, що котушка має один виток. У кожній замкнутій області машини задаємо матеріал і провідність даної ділянки машини. Криві намагнічування матеріалу зубців статора і ротора взяті з довідкової літератури. При розрахунках прийнято, що використовується електротехнічна сталь 2411 [22].

Розподіл магнітних ліній в розрахунковій схемі ВІД під час узгодженого і неузгодженого положень при включеній фазі А представлені на рис. 26 та 27.

За допомогою підпрограми, написаної в текстовому файлі на мові Lua автоматизуємо процес розрахунку. Граничними областями при цьому є положення зубців статора і ротора – від неузгодженого до узгодженого положень, що складає  $22,5^\circ$ , а також допустимих значень МРС на рівні 40000А.



*Рисунок 26. Розподіл магнітного поля у зубцях ВІД при узгодженому положенні*



*Рисунок 27. Розподіл магнітного поля у зубцях ВІД при неузгодженому положенні*

При дослідженні роботи гібридної системи з вентиляльно-індукторним приводом (ВІП) була використана імітаційна модель, наведена на рис. 28, з застосуванням в якості приводного ВІД.

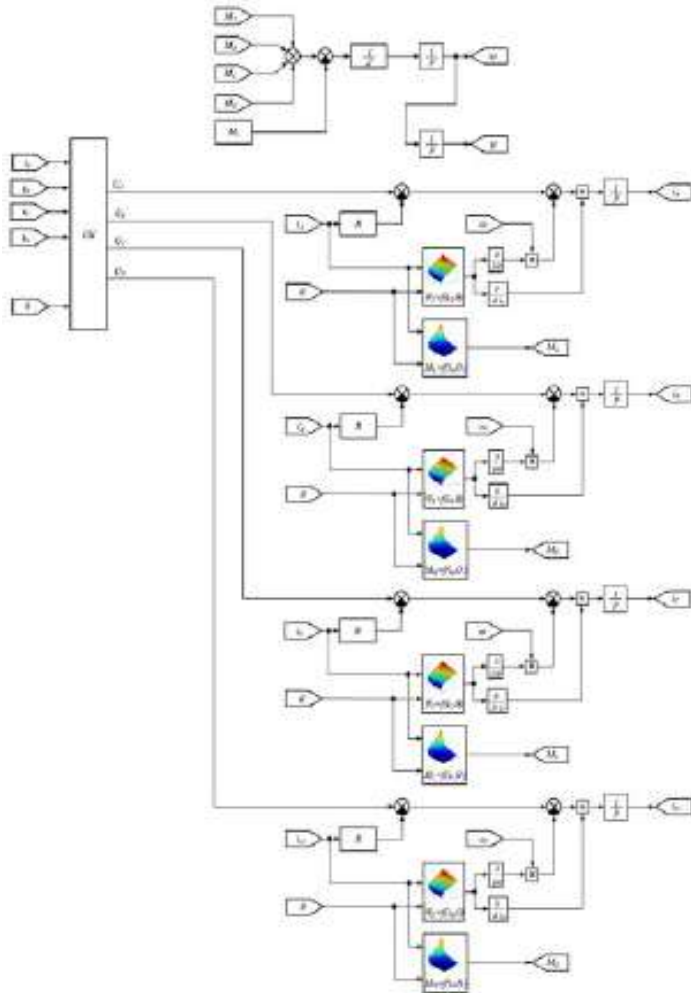


Рисунок 28. Імітаційна модель ВІД

У результаті імітаційного моделювання були отримані основні осцилограми, що наведені на рис. 29-32. При моделюванні використовувався однакова по довжині ділянка шляху з підйомами, спусками та поворотами, та змінювалось максимальне значення швидкості руху.

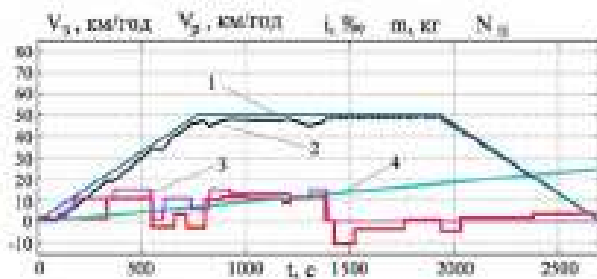


Рисунок 29. Осцилограми роботи гібридного бронетранспортера з ВІД при максимальній швидкості 50 км/год: 1 – задана тахограма; 2 – реальна швидкість; 3 – профіль шляху; 4 – витрати палива

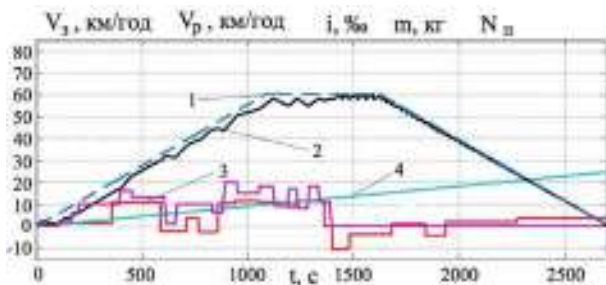


Рисунок 30. Осцилограми роботи гібридного бронетранспортера з ВІД при максимальній швидкості 60 км/год

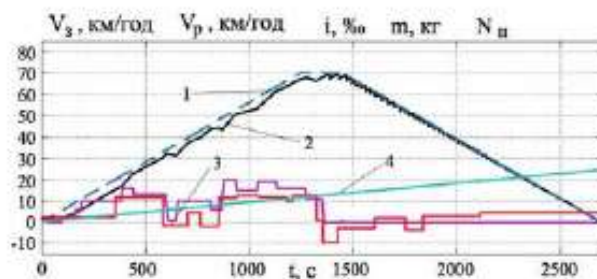


Рисунок 31. Осцилограми роботи гібридного бронетранспортера з ВІД при максимальній швидкості 70 км/год

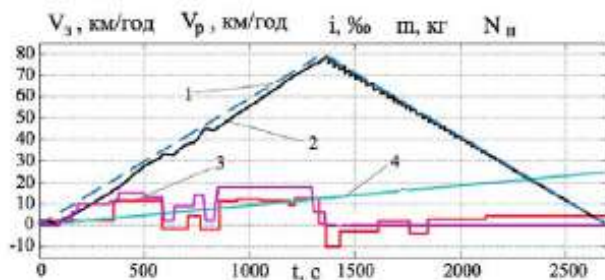


Рисунок 32. Осцилограми роботи гібридного бронетранспортера з ВІД при максимальній швидкості 80 км/год

Наведені результати підтверджують доцільність та ефективність використання гібридної системи в якості тягової на бронетранспортері.

Прагнення щодо використання енергії коливань кузова транспортного засобу призвело в останні часи до створення електромеханічних системи гасіння коливань де в якості поглинаючого елемента виступає генеруюча електромеханічна система. Найбільше поширення такі системи у автомобільному транспорті. Розглянемо їх більш детальніше.

Великий інтерес представляє електропідвеска Bose Suspension System [23, 24]. У конструкції на базі седана Lexus LS400 (рис. 33) пружинну підвіску замінили торсіонної, а амортизатори – лінійними електродвигунами, якими через потужні підсилювачі управляє комп'ютерний блок. Інформація в нього надходить від датчиків ходу кожного з коліс.

Коли колесо опускається вниз на ході відбою, електродвигун йому активно «допомагає», а на час стиснення «втягує» колесо вгору. В роботі головна увага приділялася забезпеченню плавності руху автомобіля і зниження крену кузова при поворотах.

Автори патенту [25] пропонують конструкцію електричного амортизатора, що включає в себе кручений елемент, зовнішня частина якого виконана з електропровідного матеріалу. Магнітний елемент складається з стрижня, на центральній осі якого розташовані магніти. Зовнішня частина виконана таким

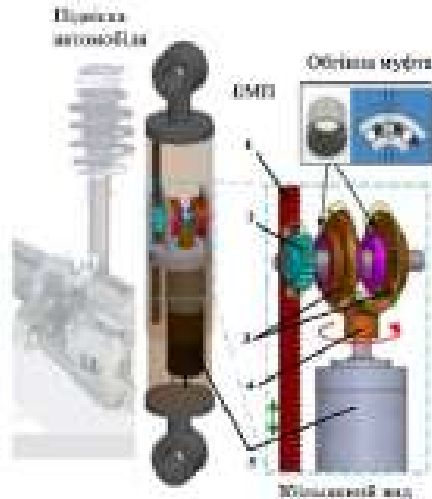


*Рисунок 33. Підвіска коліс з пружним елементом і електричним лінійним двигуном*

чином, що при вертикальних переміщеннях колеса стрижень з магнітами в неї може увійти. Виникає в обмотці струм залежить від ходу колеса.

Оригінальне рішення представлено в роботі [26]. Пропонується використовувати в складі амортизатора підвіски автомобіля електричний генератор (рис. 34). Амортизатор має рейкове-шестерний механізм, який перетворює лінійний рух поршня в обертальний рух ротора. Одностороннє обертання ротора при різних напрямках руху колеса забезпечується двома конічними шестернями, включених через дві обгонні муфти, що мають протилежні по напрямку механізми замикання, на одну провідну шестерню, яка з'єднана з якорем генератора. Така схема ускладнює конструкцію, а ударні навантаження в підвісці призводять до істотного зниження ресурсу обгінних муфт. У роботі виконано моделювання процесів і представлені результати досліджень при використанні пристроїв на автомобілі.

У роботі [27, 28] розглянуто метод контролю вагових підвісок автомобіля за допомогою керованих електромеханічних амортизаторів, активованих за допомогою генераторів енергії без використання зовнішнього джерела живлення. Обертальний рух ротора генератора посилюється передачею і активує генератор для вироблення електроенергії. Напряга, яка генерується при роботі амортизатора, експериментально оцінюється за величиною і частотою.



*Рисунок 34. Модифікований електромеханічний перетворювач-амортизатор:  
1 – рейка; 2 – шестерня; 3 – провідні конічні шестерні; 4 – ведена конічна шестерня; 5 – генератор*

За допомогою контролера Skyhook створено та експериментально реалізовано механізм зменшення коливань шляхом регенерації енергії. Було експериментально доведено, що при русі по нерівній, хвильовій дорозі параметри підвіски можна контролювати шляхом активації електромеханічних амортизаторів певної величини регенованої напруги.

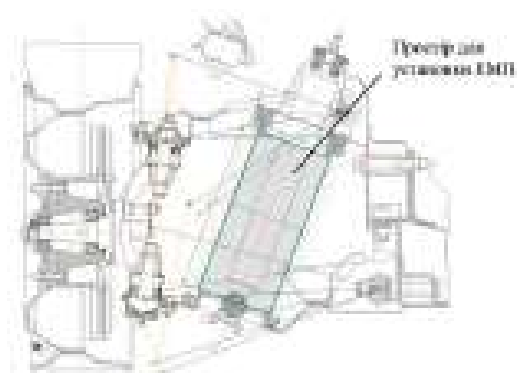
Автори роботи [28-30] пропонують перетворювати кінетичну енергію безпружинних мас, що мають зворотно-поступальні переміщення при русі машини по нерівностях, в обертальний рух вала накопичувача. Як накопичувач можуть виступати маховик, компресор з балоном стисненого повітря, генератор електричного струму з акумулятором. Запропоноване технічне рішення забезпечує при зміні напрямку швидкості руху мас обертання приводу накопичувача в одному напрямку.

Головною проблемою всіх запропонованих конструктивних рішень є те, що вони ні на крок не просунулися на шляху до серійного впровадження

в конструкцію автомобіля. Невирішеними проблемами є: надмірні безпружинні маси, складність конструкції, низька надійність і недостатня швидкодія електроніки, що особливо критично на поганих дорогах. В першу чергу така ситуація обумовлена відсутністю в широкому обсязі теоретичних і експериментальних досліджень динаміки механічної та електромагнітної систем при спільній роботі, оцінки їх взаємодії при різних параметрах і характеристиках, а також обґрунтування вибору конструктивних параметрів оригінальних пристроїв.

При використанні електричної машини застосування пристрою обертального (ротативних) типу виглядає привабливо, але складність конструкції механічної частини збільшує його масу і підвищує вартість.

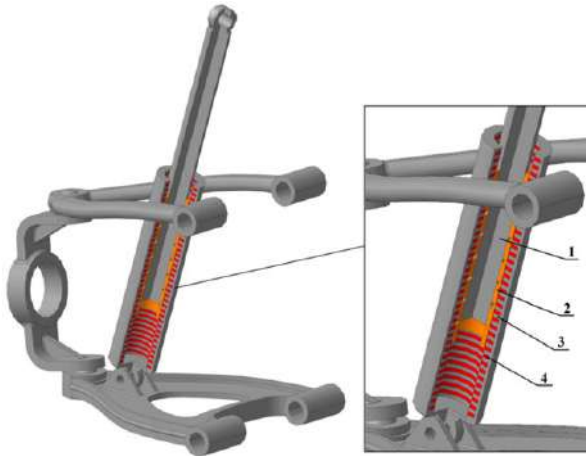
Альтернативою ротативних електромеханічних перетворювачів є лінійні перетворювачі (рис. 35). В роботі [28, 31] попередньо опрацьований варіант компоновання електромеханічного амортизатора в передню підвіску легкового автомобіля (рис. 35) при максимальному використанні простору і збереженні серійного пружного елемента підвіски-пружини.



*Рисунок 35. Компоновання електромеханічного амортизатора на автомобілі всередині пружини*

Попередні розрахунки і оцінка показників електромеханічного амортизатора показали, що геометричні обмеження суттєво зменшують його

можливості і доцільно збільшити розміри до максимуму за умовами компоновання підвіски або застосувати торсіонну підвіску колеса [28]. В останньому випадку, простір для розміщення електромеханічного амортизатора можливо збільшити для даної моделі в 1,9 рази. 3D-модель пропонуваного пристрою представлена на рис. 36.



*Рисунок 36. 3D-модель основних елементів системи важеля підвіски автомобіля з електромеханічного амортизатором: 1 – ротор; 2 – постійні магніти; 3 – корпус; 4 – котушки обмоток фаз*

Для визначення характеристик при прийнятих габаритах, а також конструктивної опрацювання електромеханічного амортизатора необхідно, використовуючи ескіз підвіски, вписати в нього конструкцію електромеханічного амортизатора, а потім з використанням програмного комплексу провести цифровий експеримент і визначити значення сили взаємодії ротора і статора. Максимальні значення цієї сили повинні бути рівні за величиною силі демпфірування використовуваних амортизаторів.

Попередня оцінка силових показників електромеханічного амортизатора показала, що при створенні такого роду пристроїв доцільно використовувати

максимально можливий простір в підвісці автомобіля. Для цього раціонально застосування індивідуальної підвіски коліс.

При гасінні енергії механічних коливань електромеханічного амортизатор забезпечує вироблення електричної енергії. Середню потужність його доцільно визначити відношенням роботи електричного струму в кожній фазі до часу з урахуванням втрат в електричному колі.

Таким чином електромеханічні амортизатори мають можливість регулювати силу демпфування в залежності від режимів руху транспортного засобу, дає можливість не тільки утилізувати енергію коливань рухомого складу, а і повернути її до електричного кола транспортного засобу з можливістю повторного використання. Спираючись на досвід створення електромеханічних амортизаторів для автомобільного транспорту конструкція та принципи дії амортизаторів повинні враховувати геометричні можливості розташування їх на візках, можливості бортового кола для прийому енергії, що рекуперується, та вимоги щодо сил демпфування електромеханічного амортизатора.

При виборі типу електромеханічного перетворювача амортизатора відзначимо, що з відомих на сьогодні типів – асинхронного, синхронного, електромагнітного та постійного струму, найбільш гідною кандидатурою, на нашу думку, видається останній [32]. Справа в тому, що два перших типи для забезпечення відносно невеликих переміщень із заданою силою і швидкістю руху штока, а також регулювання цих параметрів зажадає досить складних напівпровідникових перетворювачів, що змінюють напругу і частоту до одиниць Гц на виході. Крім того, у цих типів двигунів не висока переважувальна здатність. Для третього характерна досить нерівномірна характеристика сили тяги від переміщення, яка близька до гіперболічної. Для електромеханічного амортизатора потрібна постійна тягова (механічна) характеристика що змінюється лише від швидкості руху якоря.

Таким чином зупинимося на конструкції що наведено на рис. 37.

Принцип дії амортизатора складається у наступному [33, 34]. Постійний магніт 4 (рис. 37) має радіальне намагнічення. Силкові магнітні лінії потоку

збудження замикаються по колу: повітряний зазор з якорем 1 та обмоткою

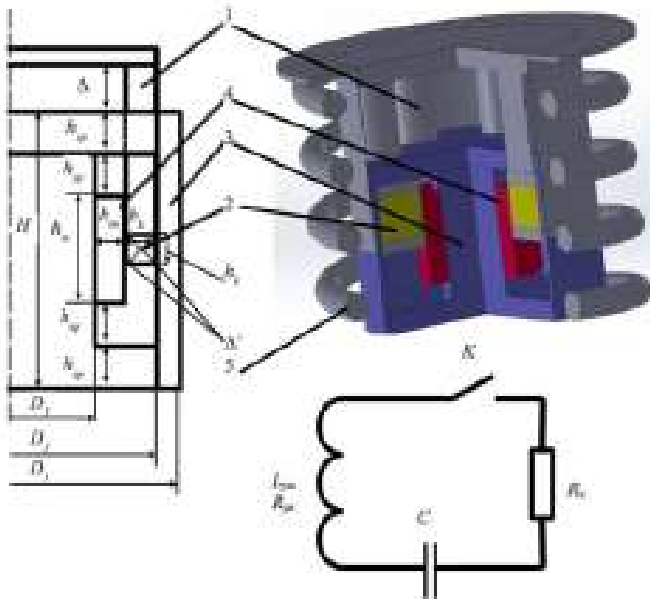


Рисунок 37. Електромеханічний амортизатор постійного струму:

1 – якір; 2 – обмотка якорю; 3 – станина; 4 – постійний магніт; 5 – пружина

якорю 2, спинка станини, станина 3, постійний магніт. Потік збудження зчіплюється з обмоткою якоря, що розташована на немагнітному якорі. При русу якоря (до низу або до верху), що обумовлений зовнішніми динамічними силами коливання кузова та візка, якір рухається. У обмотці якоря виникає ЕРС. При замкненні обмотки якоря на навантаження виникає струм якоря. У провідниках обмотки якоря зі струмом виникає сила, яка направлена супротив динамічної сили, що призводить до демпфування коливань кузова. На потік збудження впливає потік реакції якоря, що розмагнічує одну з половин магнітного кола станини (верхню чи нижню) в залежності від напрямлення руху якоря (донизу чи до верху), а іншу (протилежну) намагнічує, що може призвести до насичення магнітного кола та зменшення електромагнітної сили. Усі ці процеси доволі

аналогічні процесам у уніполярній електричній машині постійного струму.

Як видно з принципу дії електромагнітна сила залежить, в першу чергу, від струму у обмотці якоря. На силу практично не впливає положення якоря відповідно станини, що забезпечує стабільність сил демпфування при зазорах між кузовом та візком. Цей вплив найбільше помітний при крайніх положеннях якорю та великих значеннях струму його обмотки коли різко збільшується потік розсіювання. Для стабілізації параметрів можливо застосування регулювання опору кола якоря, як і регулювання електромагнітної сили.

## ВИСНОВКИ

Подальший розвиток колісних машин доцільний із застосуванням електромеханічних трансмісій. Розробка нових типів тягових електродвигунів дає можливість створенню принципово нових технічних рішень в області електричних трансмісій колісних транспортних засобів.

Створення приводу на основі мотор-колів змінює основні принципи побудови ходової частини транспортного засобу та наділяє його новими можливостями щодо керованості та маневреності.

Зазначено, що найбільш перспективним напрямком розвитку автономних енергоустановок для легкоброньованих колісних машин є застосування вільнопоршневих ДВЗ з лінійними генераторами у якості джерела електричної енергії, виключивши перетворення поступального руху в обертальний, що веде до збільшення загального ККД системи.

Електрична трансмісія застосовує електричне гальмування, яке при наявності накопичувача енергії у складі електротрансмісії знижує витрати палива до 10 %. Застосування ходової частини з елементами керування та рекуперування коливань додатково покращує ефект енергозбереження при одночасному збільшенні керованості і рухливості легкоброньованих колісних машин.

Все це робить завдання проектування електромеханічних трансмісій і керованих систем підресорювання для колісних машин актуальним і своєчасним.

Застосування перспективних електромеханічних систем мають дати можливість забезпечити для вітчизняних легкоброньованих колісних машин наступні переваги:

- безступінчасту зміну швидкості і тягового зусилля;
- легкість автоматизації трансмісії і забезпечення керування машиною будь-яким членом екіпажу і дистанційного (безпілотного) керування;
- розширені можливості по рекуперації енергії уповільнення, коливань підресорених мас і т.д.;
- можливість короткочасного (прихованого) руху без працюючого ДВЗ;
- можливість короткочасного підсумовування потужності генераторної установки і накопичувачів енергії;
- відсутність жорстких механічних зв'язків між основними агрегатами, що полегшує компонування та підвищує загальну надійність;
- високу блокову уніфікацію між машинами різних видів і класів;
- більш високу живучість техніки та безпеки екіпажу, що забезпечується модульністю конструкції трансмісії за рахунок дублювання і швидкість заміни при ушкодженнях (для мотор-коліс), збереженням рухливості транспортного засобу при частковому ураженні елементів конструкції, частковому виході з ладу одного чи низки тягових двигунів, ураження частини їх магістралей живлення;
- можливість підвищити на 15...25 % мінну стійкість корпусу і збільшити динамічний хід підвіски (для мотор-коліс);
- зменшення до 10 % витрат палива, за рахунок забезпечення роботи ДВЗ в найбільш економічних режимах, накопичення та повторного використання енергії гальмування та коливань кузова;
- підвищення маневреності колісних машин за рахунок створення нових режимів роботи трансмісії при включення тягових двигунів різних бортів з різними напрямками руху, яке забезпечує до зменшення до 3 разів радіусу розвороту транспортної платформи, швидке регулювання параметрів ходової частини при русі.

Наведені результати підтверджують доцільність та ефективність використання гібридної системи в якості тягової на бронетранспортері.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. All Electric Combat Vehicles (AECV) for Future Applications / Report of The Research and Technology Organisation (RTO) of NATO Applied Vehicle Technology Panel (AVT) Task Group AVT-047 (WG-015). ISBN 92-837-1110-6. 2004. – 234 p. <http://newisbn.ru/All-electric-combat-vehicles-AECV-for-future-applications-Elektronische-Ressource--Les-v%C3%A9hicules-de/9/ebbfdfh>
2. Rondinelli E., Velardocchia M., Galvagno E. (2012). Electro-mechanical transmission modelling for series-hybrid tracked tanks. In: *International journal of heavy vehicle systems*, vol. 19 n.3, pp.256-280 – ISSN 1744-232X. DOI:10.1504/IJHVS.2012.047916. [https://www.researchgate.net/profile/Enrico\\_Galvagno/publication/263810153\\_Electro-Mechanical\\_Transmission\\_modelling\\_for\\_series-hybrid\\_tracked\\_tanks/links/0a85e53bffffb7b5800000/Electro-Mechanical-Transmission-modelling-for-series-hybrid-tracked-tanks.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Enrico_Galvagno/publication/263810153_Electro-Mechanical_Transmission_modelling_for_series-hybrid_tracked_tanks/links/0a85e53bffffb7b5800000/Electro-Mechanical-Transmission-modelling-for-series-hybrid-tracked-tanks.pdf)
3. V V Glebov, V F Klimov, S A Volosnikov. Assessment of the Possibility to Use Hybrid Electromechanical Transmission in Combat Tracked Platforms. *Mechanics, Materials Science & Engineering. Journal, Magnolithe*, 2017, 8, <10.2412/mmse.83.5.981>. <hal-01500688> <https://mmse.xyz/en/ii-mechanical-engineering-physics-vol-8/#>
4. Elektrische Kraftübertragung – Technologie und praktische Anwendung / P. Erkhart // *Soldat und Technik*, – Mai, 2003, – P. 22–27. [http://bvtv.narod.ru/1/electr/el\\_transm3.htm](http://bvtv.narod.ru/1/electr/el_transm3.htm)
5. Živko Ilijevski. A Hybrid-Electric Drive Concept For High Speed Tracked Vehicles / Brodarski Institut, Zagreb, Croatia. 2006. – 9 p. <https://bib.irb.hr/datoteka/257455.ILIJEVSKI-ISTVS-HU-Final.pdf>
6. P. Sivakumar, Rajaseeli Reginald, G. Venkatesan and others. Configuration Study of Hybrid Electric Power Pack for Tracked Combat Vehicles / *June 2017. Defence science journal* 67(4):354. DOI: 10.14429/dsj.67.11454. [https://www.researchgate.net/publication/318369026\\_Configuration\\_Study\\_of\\_Hybrid\\_Electric\\_Power\\_Pack\\_for\\_Tracked\\_Combat\\_Vehicles](https://www.researchgate.net/publication/318369026_Configuration_Study_of_Hybrid_Electric_Power_Pack_for_Tracked_Combat_Vehicles)

7. Электрические трансмиссии для современных боевых машин / Рон Хэр, Алан Лоусе, представители группы «Деренс Системз» фирмы FMC. [http://btvt.narod.ru/1/electr4/el\\_transm.htm](http://btvt.narod.ru/1/electr4/el_transm.htm)
8. Electric transmission progress in Germany. / Р. М. Огоркевич // International defense review, 1992. no. 2, pp. 153–154. [http://btvt.narod.ru/4/electric\\_transmission\\_fritz.htm](http://btvt.narod.ru/4/electric_transmission_fritz.htm)
9. Hybrid and electric power drive combat vehicles. / Je. Walentynowicz // Journal of KONES Powertrain and Transport, 2011, vol. 18, no. 1, pp. 471–478.
10. Тяговый баланс перспективного колесного бронетранспортера с электромеханической трансмиссией / Д. О. Волонцевич, Е. А. Веретенников, Я. М. Мормило, А. С. Яремченко, В. О. Карпов // Вестник НТУ «ХПИ». Серия: *Транспортное машиностроение*. – Х. : НТУ «ХПИ», 2017. – № 5 (1227). – С. 168–173.
11. Волонцевич Д. О., Веретенников Е. А., Костяник И. В., Яремченко А. С., Ефремова А. И., Карпов В. О. Выбор мощности электропривода легкобронированных гусеничных и колесных машин с использованием одно- или двухступенчатых механических редукторов. *Электротехніка і електромеханіка*. 2019. №1. С.29–35. DOI: 10.20998/2074-272X.2019.1.05. <http://eie.khpi.edu.ua/article/view/2074-272X.2019.1.05>.
12. Технические характеристики бронетранспортера БТР-4. <http://www.morozov.com.ua/rus/body/btr4.php>.
13. Технические характеристики бронетранспортера БТР-4. <http://kolleksiya.ru/tanki/632-btr-4-butsefal-sovremennyj-ukrainskij-bronetrans-porter.html>.
14. Александров Е. Е. Тягово-скоростные характеристики быстроходных гусеничных и полноприводных колесных машин. / Е. Е. Александров, В. В. Елифанов, Н. Г. Медведев, А. В. Устиненко. – Харьков : НТУ «ХПИ», 2007. – 124 с.
15. A. Boretti, «The Future of the Internal Combustion Engine After ‘Diesel-Gate,» SAE Technical Paper Series, Jul. 2017.
16. R. Isermann, «On the control and diagnosis of internal combustion engines», Combustion Engine Diagnosis, PP. 51–73, 2017.

17. T. Wallner and S. A. Miers, «Internal Combustion Engines internal combustion engine , Alternative Fuels internal combustion engine alternative fuels for», *Transportation Technologies for Sustainability*, pp. 629–666, 2013.

18. David Meeker Finite Element Method Magnetics : 2013 MagneticsTutorial <http://www.femm.info/wiki/MagneticsTutorial>

19. Kuznetsov A., Turenko T., Nikitina A., Voloshko V., Kolomiets, «Method of synthesis of closed-loop systems of active shielding magnetic field of power transmission lines», *Technical Electrodynamics*, 2016, no. 4, pp. 8-10.

20. S. Buriakovskiy, A. Maslii, and A. Maslii, «Determining parameters of electric drive of a sleeper-type turnout based on electromagnet and linear inductor electric motor», *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, vol. 4, no. 1(82), p. 32, Aug. 2016.

21. S. Buriakovskiy, M. Babaiev, B. Liubarskiy, A. Maslii, N. Karpenko, D. Pomazan, A. Maslii, and I. Denys, «Quality assessment of control over the traction valve-inductor drive of a hybrid diesel locomotive», *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, vol. 1, no. 2 (91), pp. 68–75, Feb. 2018.

22. ГОСТ 21427.2-83 Сталь электротехническая холоднокатаная изотропная тонколистовая

23. Голованов Л. Bose мой // *АвтоРевю*. – 2011. – №12 (475). – С.53-55.

24. Bose suspension system-white paper, Bose Company 2004. – Режим доступа: <http://www.bose.com/>.

25. Pat. WO 2012/015488 США, F16F15/03, F16F6/00. Electricity generating shock absorbers / Zuo Lei; Tang Xiudong; Zhang Pei Sheng. – № US2011/024699; st. 02.12.11; pub. 02.02.12. – 28 p.

26. Lei Zuo, Brian Scully, Jurgen Shestani and Yu Zhou. Design and characterization of an electromagnetic energy harvester for vehicle suspensions // *Smart Materials and Structures*. – 2010. – №19. – P. 1–11.

27. S-B Choi, M-S Seong and K-S Kim. Vibration control of an electrorheological fluid-based suspension system with an energy regenerative mechanism // *Journal of Automobile Engineering*. – 2009. – April, vol. 233. – P. 459–470.

28. Сергиенко А. Н. Рациональное использование энергии автомобиля с гибридной силовой установкой и электроамортизаторами Специальность 05.22.02 – Автомобили и тракторы : Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук Харьков – 2014. – 279с.

29. Пат. на изобретение РФ №2013217. МПК В60G 13/14. Транспортное средство / Веденеев С.А.; заявитель и патентообладатель Веденеев С. А. – №4844202/11; заявл. 26.06.90; опубл. 10.10.2000. Бюл. №28-2000. – 2 с.: ил.

30. Пат. 93154 Україна, МПК F03G7/08, В60К 25/00. Пристрій для рекуперації енергії коливань транспортного засобу / Сергієнко М.С., Худолій О. І., Сергієнко А.М.; заявник та патентовласник Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут». – № а200912230; заявл. 27.11.09; опубл. 10.01.11, Бюл. №1.

31. Сергиенко А. Н. Анализ конструкций электромеханических преобразователей и выбор схемы электроамортизатора неподрессоренных масс транспортного средства / А. Н. Сергиенко, Б. Г. Любарский, В. . Самородов и др. // Сб. науч. тр. ХНАДУ «Автомобильный транспорт». – Вып. 31. – Х., 2012. – С. 18-25.

32. Лукашова Н. П. Підвищення ефективності роботи ходової частини рейкового міського транспорту з використанням електромеханічних амортизаторів Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук Харків – 2020 164с.

33. Liubarskyi B., Lukashova N., Petrenko O., Pavlenko T., Iakunin D., Yatsko S., Vachchenko Y. Devising a procedure to choose optimal parameters for the electromechanical shock absorber for a subway car // *Eastern-European journal of Enterprise Technologies*. 2019. № 4/5

34. Liubarskyi B., Lukashova N., Petrenko O., Yeritsyan B., Kovalchuk Y., Overianova L. Procedure for modeling dynamic processes of the electromechanical shock absorber in a subway car // *Eastern-European journal of Enterprise Technologies*. 2019. № 5/5 (101). P. 44–52.

# ФІЗИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ МАГНІТНОГО ПОЛЯ БЛИСКАВКИ

*Князєв В. В.*

## **Вступ**

Прагнення України оновити свої збройні сили сучасним озброєнням та військовою технікою (ОВТ) власної розробки потребує впровадження комплексу науково-технічних заходів щодо забезпечення відповідності ОВТ чинним вимогам НАТО, у тому числі з електромагнітної сумісності (ЕМС), які є обов'язковими для більшості видів ОВТ у зв'язку із широким застосуванням електронних систем керування, обробки даних, автоматизованого прийняття рішень та інше. Такі системи вкрай вразливі до впливу зовнішніх електромагнітних завад природного та штучного походження та можуть функціонувати у нештатному режимі за розміщення в обмеженому просторі декількох систем. Для досягнення мети з реалізації вимог національних стандартів України в галузі ЕМС ОВТ гармонізованих з відповідними стандартами НАТО, яким надано чинності з 01.02.2021 року, в НДПКІ «Молнія» НТУ «ХПІ» розпочато розробку та введення в дію експериментальних зразків необхідного випробувального обладнання та засобів вимірювальної техніки. Таким чином українські виробники вже зараз мають можливість підтвердити відповідність створених зразків ОВТ вимогам стандартів НАТО з ЕМС шляхом проведення випробувань. Без реалізації цих заходів зразки українських ОВТ будуть втрачати конкурентну спроможність на світовому ринку.

В усіх розвинутих країнах світу активно проводяться дослідження щодо створення потужних деструктивних електромагнітних завад, спроможних виводити з ладу системи керування ОВТ, наприклад, безпілотними літальними апаратами. Крім того, існує низка ефектів пов'язаних з природою функціонування технічних засобів. Не можливо також виключати ймовірність впливу інтенсивних електромагнітних завад в наслідок прямого або непрямого удару блискавки. Враховуючи принципову важливість проблеми, результати досліджень, основну частину яких здійснено в наукових структурах

Міністерства оборони США, узагальнено у таких стандартах: MIL STD 461G:2011 [1] та MIL STD 464C:2010 [2]. На базі цих стандартів розроблено відповідні стандарти НАТО: АЕСТР 500:2016 [3] та АЕСТР 250:2014 [4]. Вказані стандарти, містять вимоги щодо методик випробувань, у тому числі такі, що є наслідком подій низької ймовірності, наприклад, електромагнітного імпульсу висотного ядерного вибуху.

Доцільно при визначенні вимог ЕМС до сучасних зразків ОБТ керуватись вимогами відповідних військових стандартів США [1, 2] та/або стандартів НАТО [3, 4]. Важливе, що різниця між цими комплексами стандартів є, але вона не суттєва, обумовлена часом на видання чергової редакції стандарту НАТО після появи нової редакції стандарту США.

У роботі [5] узагальнено вимоги цих стандартів, та можливості реалізації випробувань за регламентованими в них видами. Зрозуміло, що вимоги до зразку ОБТ в цілому (у термінах стандартів – платформи) відрізняються від вимог до бортового обладнання, яке встановлюється на платформу. Тому, впроваджено два стандарти НАТО у галузі ЕМС:

1. NATO АЕСТР-500:2016 [3], який містить вимоги з ЕМС до складових частин військової техніки, що забезпечує перш за все можливість сумісного функціонування обладнання в умовах замкнутого об'єму, та забезпечення визначеного рівня несприйнятливості до впливу зовнішніх чинників.

2. NATO АЕСТР-250:2014 [4], який містить вимоги з ЕМС до військової техніки (платформи) в цілому, включаючи забезпечення заданого рівня несприйнятливості до зовнішніх потужних електромагнітних завад (ЕМІ ЯВ, грозові розряди, РЕП тощо).

Рекомендації щодо реалізації вимог цих стандартів, основані на досвіді багаторічних випробувань, вказують на необхідність послідовного підтвердження відповідності спочатку складових частин, а потім платформи в цілому. Стандарт [3] на 70 % складається з вимог стандарту MIL-STD-461F, а решта 30 % – це випробування за стандартом Def Stan 59 – 411 [6]. Розглянемо побудову стандарту NATO АЕСТР-500:2016 [3]:

□ всі види випробувань мають абрєвіатури скомпоновані з чотирьох букв – CE, CS, RE та RS, де E – це емісія, S – несприйнятливість (стійкість), C – кондуктор / провідник, R – випромінювання, тобто CE та RE – це емісія радіозавад у проводи, що відходять від виробу, та в «ефір», відповідно, а CS і RS – це несприйнятливість до дії електромагнітних завад у провадах, які підключені до виробу, та за «ефіром»;

– попереду до вищеназваних літерних абрєвіатур додано букву N, тобто всі види випробувань описуються абрєвіатурами NCE, NCS, NRE та NRS;

– до кожного вказаного вище набору букв додано цифрову нумерацію від 01 і далі;

Вичерпний перелік з 25 видів випробувань, що регламентує стандарт [3], наведено в ньому у табл. Table 501-1. З цих видів випробувань основні чотирнадцять реалізовано, про що вказано у роботі [5]. Таким чином, бортове обладнання ОБТ може пройти відповідні випробування вже зараз.

Слід відзначити, що реалізація випробувань зразків ОБТ (платформ) за стандартом [4] вимагає значно більшого об'єму фінансування, що обумовлено габаритними розмірами установок та їх потужністю. В якості першого кроку на цьому шляху, розроблено експериментальні зразки установок (імітаторів), які генерують електричні та магнітні поля, що супроводжують блискавку на відстані 10 м від каналу. Дані про установку що утворює електричне поле близького удару блискавки наведено у роботі [7].

Далі представлено результати розробки та створення двох варіантів експериментальних зразків імітаторів магнітного поля для випробувань за видом NL254-H стандарту [4], які відрізняються розмірами робочих об'ємів.

### **Аналіз вимог щодо випробувань магнітними полями блискавки**

Стандарт [2, табл. 8] встановлює, що швидкість наростання напруженості магнітного поля при імітації розряду блискавки «хмара-земля» повинна бути  $2,2 \cdot 10^9 \text{ Ам}^{-1}\text{с}^{-1}$ . Це значення визначається як припущення, що канал блискавки вертикальний відносно поверхні ґрунту, сила струму блискавки 200 кА,

залежність сили струму від часу відповідає компоненті  $A$ , а відстань до каналу блискавки 10 м. Вважається, що якщо відстань буде меншою, то з високою ймовірністю блискавка вдарить в зразок ОБТ. Розрахунок напруженості здійснюється на основі закону Ампера [2, р. 87].

$$\dot{H}(t) = \dot{I}(t) / 2\pi r,$$

де  $r$  – відстань від каналу блискавки до точки спостереження, що знаходиться на поверхні Землі, крапки над літерними позначеннями фізичних величин (напруженості магнітного поля і сили струму) позначають похідну за часом.

Амплітудно-часові параметри компоненти  $A$  струму блискавки, задані в табл. 1, визначено для форми імпульсу яку представлено на рис. 1, у вигляді уніполярного імпульсу, що дозволяє здійснити контроль за правильністю розрахунків похідної за часом (перехід через нуль на максимумі сили струму).

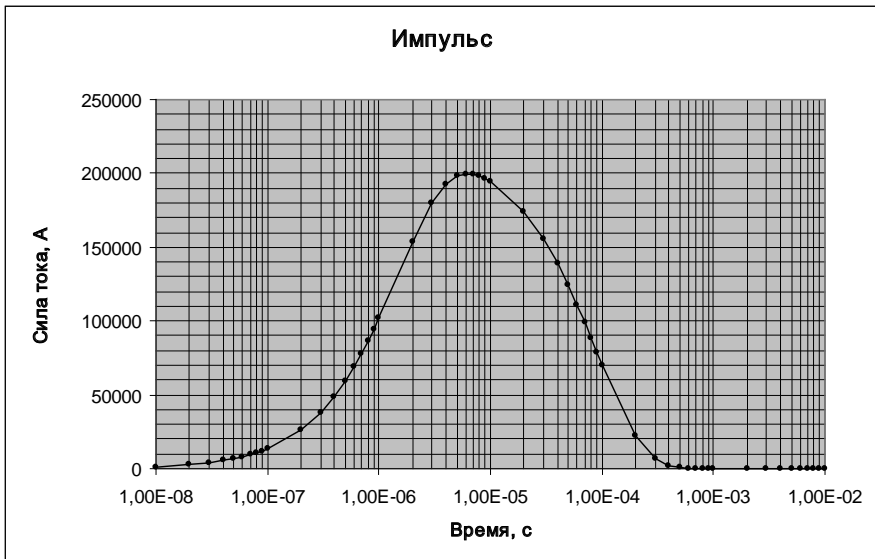


Рисунок 1. Форма часової залежності компоненти  $A$  струму блискавки

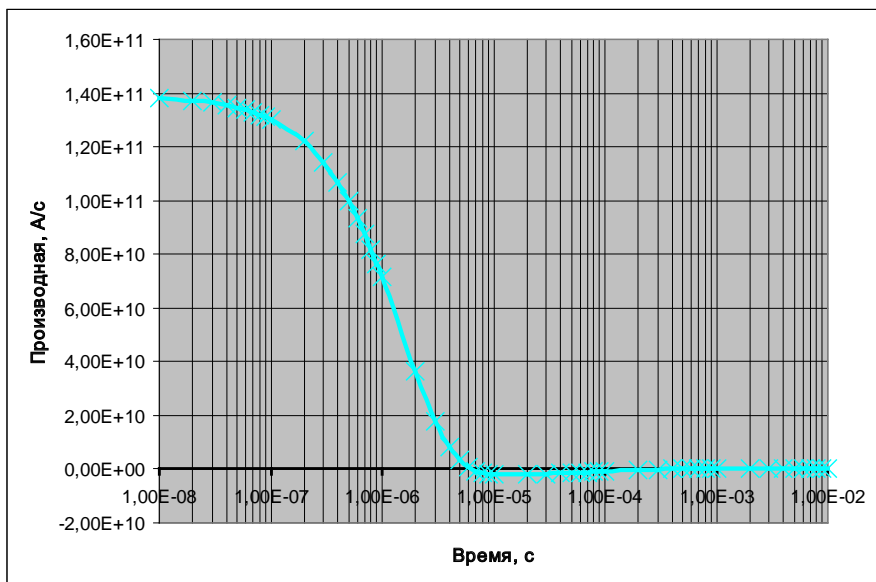


Рисунок 2. Похідна компоненти  $I$  струму блискавки

Таблиця 1. Характеристики форм непрямих ефектів блискавки [2].

Current component	Peak current (kA)	Action Integral ( $A^2 \cdot s$ )	Decay to 50% ( $\mu s$ )	Time to 10% ( $\mu s$ )	Time to 90% ( $\mu s$ )	Time to Peak ( $\mu s$ )	Rate of rise (A/s)	Peak rate of rise $t = 0+$ (A/s)
A	200	$2.0 \times 10^6$	69	0.15	3.0	6.4	$1.0 \times 10^{11}$ @ 0.5 $\mu s$	$1.4 \times 10^{11}$
B	Produces average current of 2 kA over a 5 millisecond period							
C	Defined as rectangular waveform for analysis purposes of 400 A for 500 milliseconds							
D	100	$0.25 \times 10^6$	34.5	0.08	1.5	3.18	$1.0 \times 10^{11}$ @ 0.25 $\mu s$	$1.4 \times 10^{11}$
D/2	50	$6.25 \times 10^4$	34.5	0.08	1.5	3.18	$0.5 \times 10^{11}$ @ 0.25 $\mu s$	$0.7 \times 10^{11}$
H	10	N/A	4.0	0.0053	0.11	0.24	N/A	$2.0 \times 10^{11}$

Для знаходження максимального значення швидкості наростання напруженості магнітного поля розрахована похідна сили струму блискавки за часом. Результат розрахунку представлений на рис. 2.

З рис. 2 видно, що імпульс струму має максимальну швидкість наростання  $1,4 \cdot 10^{11}$  А/с (за сили струму  $2 \cdot 10^5$  А), що відповідає даним, які записані у табл. 1 [2, табл. А-11] для компоненти А.

Розділивши значення максимальної швидкості наростання сили струму на  $62,8$  ( $2\pi R$ ,  $R = 10$  м) отримуємо  $2,23 \cdot 10^9$  А·м<sup>-1</sup>·с<sup>-1</sup>, значення, вказане в табл. 8 стандарту [2] для напруженості магнітного поля. Алгоритм розрахунку рівня напруженості магнітного поля важливий, оскільки дозволяє визначити граничні параметри для зразка ОВТ, з урахуванням його технічних особливостей (габаритних розмірів, навколишніх об'єктів, систем захисту від блискавок). Слід зазначити, що вказане вище значення швидкості наростання напруженості магнітного поля є максимально можливим, виходячи з наведених у стандарті формул, що описують часову залежність сили струму в каналі блискавки. Це значення досягається в момент часу  $t = 0 +$ . У реальності, струм не зростає в момент «увімкнення» стрибком, і завжди має ділянку плавного наростання. Отже, при визначенні параметрів напруженості магнітного поля, які повинні бути реалізовані для цілей випробувань стійкості ОВТ, доцільно виходити із значення середньої швидкості наростання, яка одержується в результаті поділу різниці значень напруженості на рівнях  $0,1-0,9$  від максимального значення  $\Delta I_{0,1-0,9}$  на інтервал часу між моментами досягнення цих значень  $\Delta t_{0,1-0,9}$ . В цьому випадку, значення швидкості наростання напруженості магнітного поля на відстані 10 м дорівнюватиме  $8,9 \cdot 10^8$  А·м<sup>-1</sup>·с<sup>-1</sup>, що в 2,5 рази менше, ніж потрібно за табл. 1. Крім того, можливий варіант вибору значення швидкості наростання магнітного поля виходячи зі значення швидкості наростання сили струму  $1,0 \cdot 10^{11}$  А·с<sup>-1</sup>, яке досягається в момент часу 0,5 мкс, що видно з рис. 2 і даних табл. 1. Виходячи з максимально високих вимог стандарту [2], при випробуваннях зразка ОВТ, прийнято в якості цілі досягнення значення швидкості наростання напруженості магнітного поля  $2,23 \cdot 10^9$  А·м<sup>-1</sup>·с<sup>-1</sup>. Враховуючи сказане вище, для цього достатньо задати імпульсу напруженості магнітного поля часову форму, яка аналогічна формі компоненти А струму блискавки.



Слід зазначити, що у вказаній процедурі, також, представлено фото випробувань ОВТ системного рівня [7, Fig. C-4], для чого використовується полеутворююча система типу полозкової лінії (ПЛ), виконана з провідної сітки. Орієнтовна висота підвісу верхнього електрода становить 3 м. Однак, інших даних щодо цього випробування в процедурі не наводиться. Такий варіант реалізації розглянуто далі.



*Рисунок 3. Зовнішній вид полеутворюючої систем під час випробувань [8, Fig. C-4]*

#### *Ключові показники якості елементів імітатора*

Комплект випробувального устаткування для створення магнітного поля блискавки як мінімум повинен включати наступні елементи, параметри яких взаємно узгоджені:

- підвищувально-випрямний пристрій, потужність якого дозволяє забезпечувати швидкість заряду генератора імпульсного струму (ГІС) до робочої напруги швидше, ніж за 5 хвилин;
- імпульсний генератор перехідних процесів, що формує одноразовий імпульс позитивної або негативної полярності з силою вихідного струму, достатньою для створення в робочій зоні імітатора необхідної швидкості

наростання напруженості магнітного поля. Рівень вихідної напруги визначається властивостями полеутворюючої системи;

полеутворююча система має бути врахована як елемент розрядного ланцюга;

пікове значення швидкості наростання напруженості магнітного поля у випробувальному об'ємі імітатора має бути не менш ніж регламентований рівень  $(2,2 \cdot 10^9 \pm 10\%) \text{ A} \cdot \text{m}^{-1} \text{c}^{-1}$ .

Перелік типового обладнання, що використовується під час проведення випробувань на близький удар блискавки (БУБ), представлений в табл. 2 [8, Table C-3]. Вимоги до обладнання взяті з процедури [8, підрозділ 3.2].

а. Якщо не вказано інше, допуски для випробувального обладнання повинні відповідати обмеженням, які гарантують достатню точність визначення амплітудно-часових параметрів імпульсу магнітного поля.

б. Використання засобів вимірювальної техніки (ЗВТ) в процесі випробувань допускаються, але вони не повинні впливати на результати випробувань. ЗВТ можуть включати наступні елементи, представлені на рис. 4 [8, Fig. 3-1], для випробувань електричного детонатора (EID).

У процесі випробувань може знадобитися проведення моніторингу стану зразка ОВТ до і після кожного випробування або здійснення моніторингу стану в процесі впливу. В цьому випадку, допоміжне обладнання повинно бути захищене від дії випробувальних полів шляхом максимально можливого віддалення від точки удару. Кабелі інтерфейсу будь-якого випробувального комплексу повинні бути добре екрановані і розташовуватися далеко від точки удару, щоб мінімізувати вплив імпульсних полів на них.

Як вказано раніше, випробувальні установки можуть бути різними, але загальні вказівки щодо влаштування типових випробувальних установок за рекомендаціями [5, с. C-5] такі:

а. Обстановка БУБ створюється шляхом розряду конденсаторної батареї через кабелі низького опору в точку розряду БУБ.

Таблиця 2. Перелік типового обладнання [8, Table C-3].

Обладнання	Коментарі
Імітатор БУБ	Можливий власної конструкції і типу – зазвичай великий генератор Маркса, призначений для генерації заданої форми сигналу струму
Джерело потужності	Високовольтне джерело енергії, що використовується для заряду конденсаторної батареї
Дільник напруги	Для вимірювання напруги заряду конденсаторної батареї
Зонд струму А	Для вимірювання струму, який наведений на ОВТ. Потрібно декілька в різних фізичних розмірах і допустимих навантаженнях за струмом
Зонд струму В	Для вимірювання струму, який наведений в кабелі ОВТ (зонд затискного типу – використовується тільки в разі, коли провід не може бути розрізаний). Потрібно декілька зондів різних розмірів і допустимих навантажень за струмом.
Поверхневий зонд струму	Використовується для вимірювання струмів на поверхні ОВТ. Потрібно декілька зондів різних розмірів і допустимих навантажень за струмом.
Волоконно-оптичний телеметричний модуль	Підключається до зондів і збуджує оптико-волоконний вихід. Потрібно декілька модулів різних розмірів і допустимих навантажень за струмом
Цифровий осцилограф	Використовується для запису і візуального відображення вимірювань струму і напруги. Повинен працювати в частотному діапазоні 100 кГц – 400 МГц.
Пересувний комп'ютер	Для обробки даних (напр., розраховує запаси міцності ОВТ, здійснює побудову графіків, зберігає дані)
Програмне забезпечення випробувань	Для обробки і представлення даних
Зонди та датчики полів Е и Н	Зонди, які необхідні для калібрування і спостереження за полем в реальному часі

в. Швидкодіючі зонди струму використовуються для спостереження та контролю за струмом і для вимірювання енергії випробувального імпульсу. Телеметричні модулі використовуються для перетворення електричних сигналів в оптичні сигнали і передачі їх через волоконно-оптичні лінії до приймача в екранованій області, де вони перетворюються назад в електричні сигнали, обробляються, спостерігаються (на моніторі цифрового осцилографа),

і записуються в ноутбучі для попередньої обробки даних. Програма попередньої обробки даних випробувань проводить розрахунок необхідних значень фізичних величин на основі значень параметрів, вимірюваних випробувань, проводить діагностику зразка ОБТ, забезпечує інтерфейс користувача (організовує дані і представлення результатів у вигляді графіків, діаграм тощо).

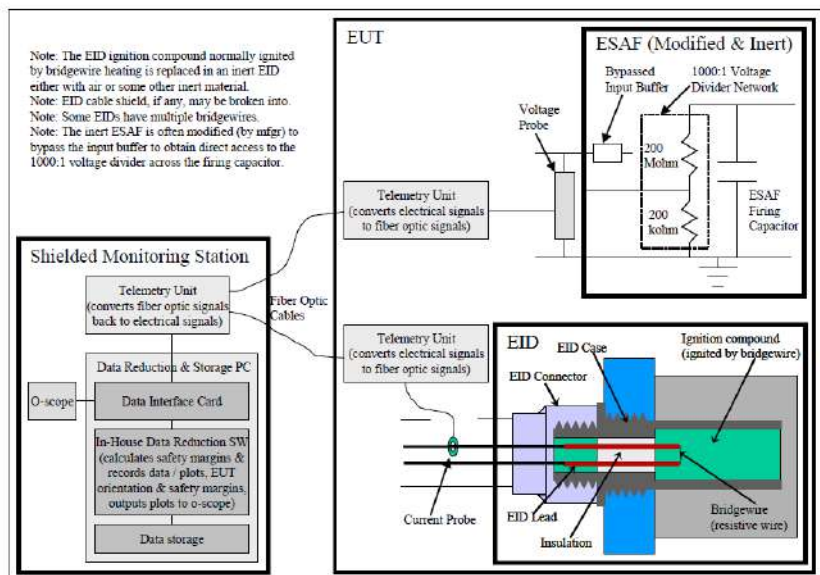


Рисунок 4. Типове забезпечення засобами вимірювань EID [8, Fig. 3 1]

– EID – детонатор з електричної ініціацією;

– ESAF – електронний запобіжно-виконавчий механізм

с. Випробувальне обладнання калібрується уздовж радіальної осі від центру котушки, що утворює поле, щоб встановити відстань, необхідну для досягнення заданої напруженості поля. Під час ЕМ впливу на ОБТ напруженість поля вимірюється в точках, розташованих на лінії, що з'єднує вісь каналу розряду і геометричний центр ОБТ, поблизу передньої і задньої стінки його корпусу.

д. Зразок ОБТ випробується мінімум в двох орієнтаціях по відношенню до вектора магнітного поля. У першому випадку поздовжня вісь об'єкта

випробувань паралельна вектору магнітного поля, а за іншої орієнтації перпендикулярна вектору магнітного поля. (Попередня оцінка, заснована на аналізі системи і можливому шляху ЕМ впливу, дозволяє визначити, що може знадобитися більше орієнтацій під час проведення випробувань).

Довгі провідні лінії, що входять до складу EUT, повинні розташовуватися таким же чином, як в реальній системі, орієнтуватися щодо випробувального впливу так, щоб забезпечити максимальний вплив на них. Лінії повинні розташовуватися на висоті не менше ніж 1 м над площиною землі, щоб запобігти впливу хвиль, відбитих від майданчика з природним заземленням.

е. Після кожного випадку випробувань, ОВТ і платформа перевіряються на працездатність і пошкодження. Якщо відбувається пошкодження, воно документується і оцінюється. Випробування не буде продовжено до тих пір, поки не буде ідентифікований режим роботи ОВТ відповідно до критеріїв, що визначають режими роботи А, В, С, D і Е, і ОВТ не буде приведено у стан нормального функціонування (режим А). При неможливості забезпечити нормальне функціонування ОВТ після ЕМ впливу, результат впливу на ОВТ визначається як режим D або Е роботи. При цьому визначається ушкоджена підсистема або вузол ОВТ і аналізуються доцільність продовження випробувань і їх можливі результати, якщо випробування триватимуть.

ф. ОВТ можуть бути оснащені засобами вимірювань, або параметри ОВТ можуть вимірюватися після імпульсного впливу. Наприклад, при випробуванні EID, опір збережених містків EID може вимірюватися до і після кожного розряду, щоб перевірити факт руйнування і спрацьовування детонатора.

г. Необхідно дати достатньо часу, щоб випробувальне обладнання стабілізувалося перед калібруванням і випробуванням. В процесі роботи необхідна періодична перевірка умови перевантаження приймача або перетворювача.

h. Вимірювальне обладнання (наприклад, осцилографи) калібрують регулярно в акредитованих лабораторіях.

У підрозділі 5.5 стандарту [2] вказується, що платформа (система) ОВТ повинна задовольняти вимогам до її експлуатаційних характеристик під час впливу непрямих ефектів блискавки. Щодо можливого типу імітатора вказівок немає. Як приклад, в рекомендаціях [8], представлена схема імітатора магнітного поля, яку наведено вище на рис. 2. Відповідно до положень стандартів [2, 4], параметри випробувального магнітного поля можуть визначатися виходячи з оцінки відстані від місця ймовірного удару блискавки до ОВТ. Фактично, записані в табл. 8 стандарту [2] вимоги, слід віднести до випробування стійкості боєприпасів, і перш за все електричних детонаторів. Очевидно, що для цього випадку застосовуються максимально «жорсткі» вимоги. Ґрунтуючись на цих рекомендаціях, для проведення випробувань, обрано два варіанти імітатора, в яких використано в якості полеутворюючої системи виток зі струмом (LH-1) та полозкову лінію (LH-2). Реалізацію проекту здійснено на площадці високовольтного випробувального стенду ВВС-1.2, розташованого у основному корпусі інституту.

### **Імітатор магнітного поля за використання одновиткової котушки**

Зовнішній вид комплексу ВВС-1.2 представлений на рис. 5 (вид з боку пульта управління). Зовнішній вид високовольтного обладнання зі сторони полозкової лінії представлений на рис. 6 (вид у бік пульта управління). На рис. 6 зліва знаходиться ГН-1.2 етажеркового типу (використовується для випробувань імпульсами електричного поля блискавки), праворуч – ГІС-100/70. Зовнішній вид генератора імпульсних струмів ГІС 100/70 представлений на рис. 7.

Генератор ГІС-100/70 здатний створювати у витку з опором до 1 Ом, імпульс струму з амплітудою до 70 кА і часом наростання/тривалістю 8/20 мкс. Для проектування генератора і визначення зарядної напруги на ГІС необхідно визначити рівень напруженості магнітного поля, який забезпечує задане стандартом [2] значення швидкості наростання  $2,2 \cdot 10^9 \text{ Ам}^{-1}\text{с}^{-1}$  при характеристиках часової реалізації імпульсу струму 8/20 мкс. У стандарті [2] прив'язка зроблена до форми компоненти  $A$  струму в розряді, яка досягає

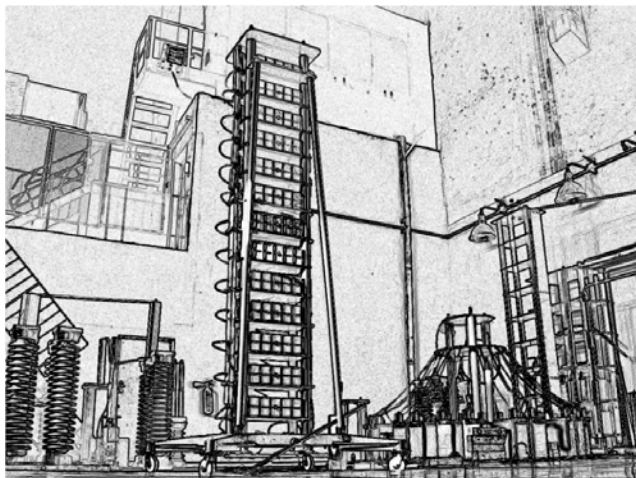
максимального значення при 6,4 мкс, а час наростання фронту імпульсу за рівнями 0,1-0,9 дорівнює 2,85 мкс (див. табл. 1). Напруженість магнітного поля від каналу блискавки при силі струму 200 кА на відстані 10 м дорівнює  $H = 200/62,8 = 3,18$  кА/м. Параметри ГІС 100/70 дозволяють генерувати імпульс з часом наростання фронту між рівнями 0.1-0.9, рівним 8 мкс, що у 2,8 рази більше, ніж встановлено стандартом [2]. Отже, для забезпечення заданого значення швидкості наростання магнітного поля, напруженість моделюючого магнітного поля в області розташування випробувального зразку повинна дорівнювати:

$$H = 3,18 \cdot 2,8 = 8,92 \text{ кА/м}$$



*Рисунок 5. Зовнішній вид комплексу ВВС-1.2*

Геометрія конструкції з полеутворюючим витком наведена на рис. 8. З урахуванням цієї конструкції полеутворюючої системи для генерації магнітного поля вказаного вище рівня напруженості, необхідно забезпечити силу струму близько 25 кА.



*Рисунок 6. Зовнішній вид високовольтного обладнання ВВС-1.2*



*Рисунок 7. Генератор імпульсних струмів ГІС-100/70*

*1 – конденсатор ІК-100-0,4 У4 (48 штук); 2 - демпфувальний резистор (48 шт); 3 - багатозазорний комутатор МЗК-100 (1 шт)*

Ємнісний накопичувач енергії ГІС заряджається від підвищувально-випрямного пристрою (ПВП). Рівень напруги, який забезпечено на конденсаторах ГІС дорівнює  $U_{зар} = 26$  кВ. При досягненні заданого рівня  $U_{зар}$ . на ємнісному накопичувачі, з пультової подається напруга на обмотку електромагнітного розрядника. Відбувається механічне замикання електродів розрядника (розрядник спрацьовує) і ємнісний накопичувач енергії розряджається на полеутворюючу систему. При цьому витком протікає струм орієнтовно 26 кА (загальний опір витка приблизно 1 Ом). В процесі випробувань рівень зарядної напруги не змінювався і дорівнював  $26 \pm 0,35$  кВ, параметри часової реалізації імпульсу струму 8/20 мкс також не змінювалися. Схематичне зображення полеутворюючої системи установки ЛН-1 для створення магнітного поля блискавки представлено на рис. 8.

Значення швидкості наростання магнітного поля варіюється за рахунок зміни точки розташування ОВТ, відповідно до певної заздалегідь калібрувальної кривої, представленої на рис. 9, уздовж обраної лінії Line 1 уздовж осі Z (див. рис. 8).

Для мінімізації можливих помилок, аспірантом С. П. Шаламовим проведено комп'ютерне моделювання процесу створення магнітного поля з урахуванням

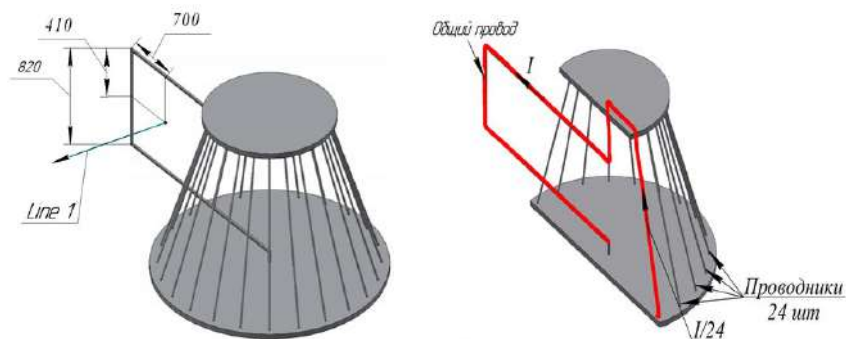


Рисунок 8. Схематичне зображення полеутворюючої системи установки ЛН-1 для створення магнітного поля блискавки

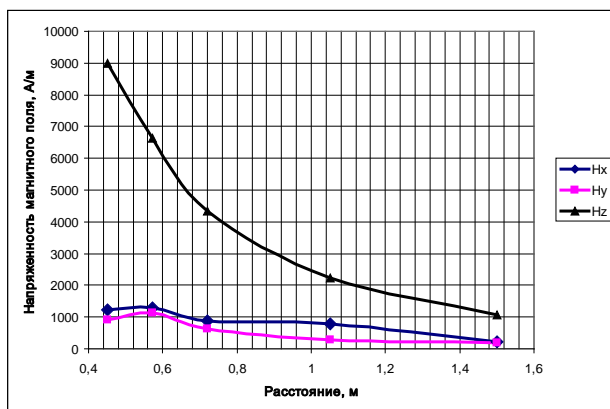
реальної конструкції цього генератора. Результат моделювання методом кінцевих елементів представлений на рис. 10, з якого видно, що основною є

компонента вектора  $H$ , яка орієнтована уздовж лінії Line 1 (позначена  $H_z$ ). Дві інші компоненти не перевищують 3 % від значення  $H_z$ . Цей факт, до певної міри підтверджують і експериментальні дані, представлені на рис. 9. Під час аналізу результатів вимірювань необхідно враховувати ефект усереднення площею, яка охоплюється контуром котушки і похибка позиціонування датчика ІНМП – 2С уздовж вісі координат.

Порівняння результатів розрахункової оцінки (рис. 10) з результатами експериментального дослідження (рис. 9) дало добрий збіг.

На підставі калібрування обрано точки, в яких слід розміщуватися ОВТ при випробуваннях. Точки обрані з урахуванням кратності 0.1; 0.25; 0.5; 0.75; 1.0 від максимального значення 8.92 кА/м напруженості магнітного поля. Результати вимірювання компонент вектора напруженості магнітного поля в цих точках, представлений в табл. 3.

Типові осцилограми, номери яких вказані у табл. 3, представлені на рис. 11.



Компонента  $H_z$  півпадає з направленням лінії Line 1

*Рисунок 9. Калібрувальна крива розподілу напруженості магнітного поля*  
Вказану криву розташовано вздовж лінії Line 1 (див. рис. 8), яку визначено експериментально. Вихідні дані представлено у табл. 3.

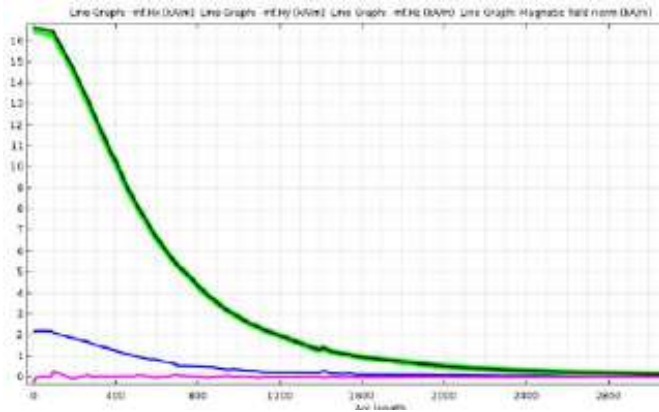


Рисунок 10. Розподіл компонент напруженості магнітного поля уздовж Line 1, отримані на основі чисельного моделювання

За віссю ординат 1 кА/м на клітину, за віссю абсцис 100 мм на клітину.

$H_x$  (синя),  $H_y$  (фіолетова),  $H_z$  – (зелена); модуль  $H$  – чорна лінія, співпадає з лінією  $H_z$

Таблиця 3. Значення напруженості  $H$  в обраних точках

Координата вздовж лінії Line1, (м)	Вісь X			Вісь Y			Вісь Z		
	№ Осцилограми	Напруга ІНМ П	Компонента поля	№ Осцилограми	Напруга ІНМ П	Компонента поля	№ Осцилограми	Напруга ІНМ П	Компонента поля
		Удх, В	$H_x$ , А/м		Удy, В	$H_y$ , А/м		Удz, В	$H_z$ , А/м
0.45	1.1	0,424	1211	1.2	0,32	914	1.3	3,04	8686
0.60	2.1	0,456	1303	2.2	0,392	1120	2.3	2,32	6629
0.72	3.1	0,308	880	3.2	0,224	640	3.3	1,52	4343
1.05	4.1	0,272	777	4.2	0,104	297	4.3	0,776	2217
1,50	5.1	0,074	211	5.2	0,066	189	5.3	0,376	1074

Для проведення випробувань обраний найпростіший варіант полеутворюючої системи у вигляді одного витка, виконаного з комбінації латунних стрижнів діаметром 8 мм прокладених у скло епоксидних трубах і мідного лудженого облєтєння. Розміри витка такі: 2,0x0,82 м<sup>2</sup>. Велика сторона витка розташована горизонтально. Зовнішній вигляд випробувального

комплексу з встановленим первинним перетворювачем (датчиком) ІНМП-2С представлено на рис. 12.

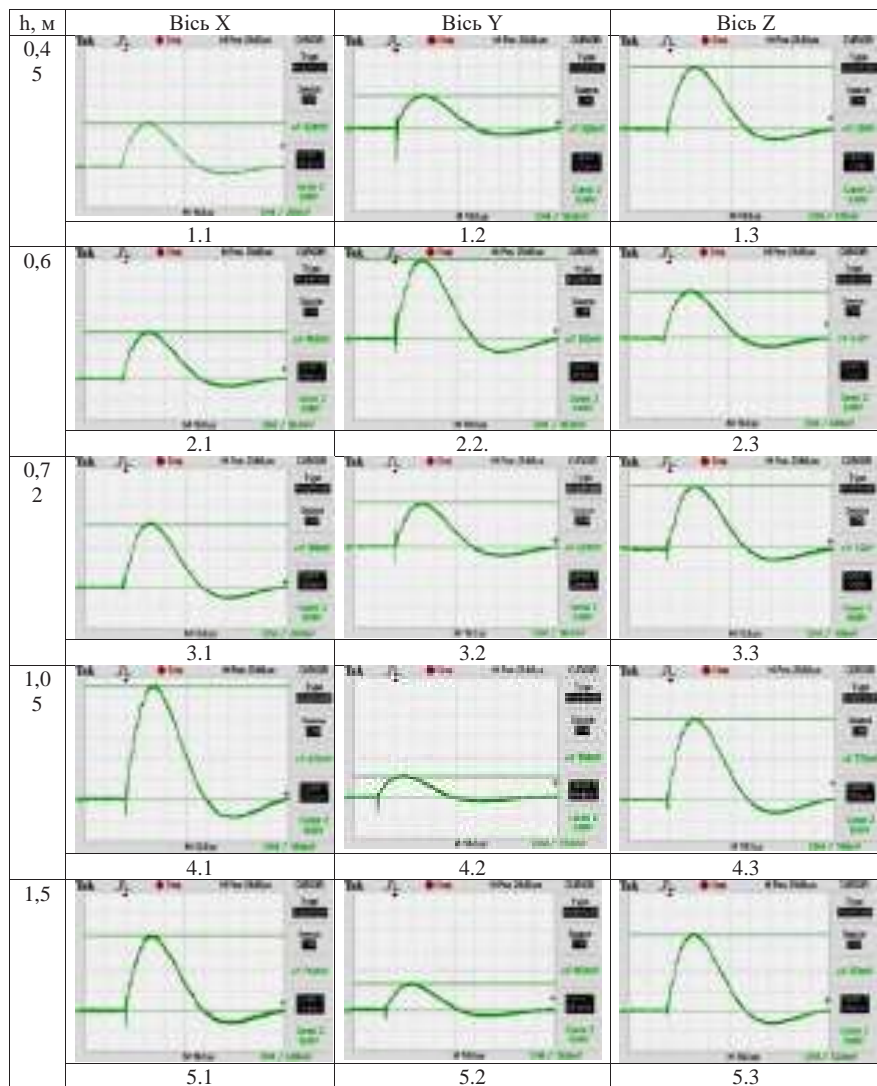


Рисунок 11. Осцилограми напруги на виході датчика магнітного поля в точках, які вибрані для розміщення ОВТ під час проведення випробувань



*Рисунок 12. Зовнішній вид випробувального комплексу з встановленим датчиком ИНМП-2С, який розташований в точці  $h_{1,5\text{м}}$*

### **Вимірювальне обладнання**

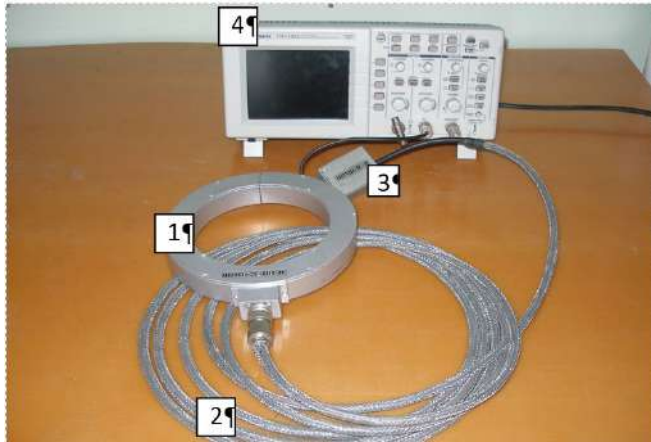
Вимірювальний комплекс, що входить до складу імітатора, забезпечує вимір вихідних параметрів імпульсного магнітного поля, що створюється в робочій зоні витка, і моніторинг сили струму в процесі випробувань. Комплекс включає таке:

- вимірювач напруженості магнітного поля инмп-2с з кабельною лінією передачі інформації, представлений на рис. 13 (розробник Ю. С. Немченко);
- два осцилографа tds 2024b і tds 1012;
- шунт вимірювальний ши-300, для вимірювання параметрів струму;
- вимірювальної екранованої kabіни;
- пультової стелду.

Усі ЗВТ мали діючі сертифікати калібрування.

Метрологічні характеристики ИНМП-2С представлені в табл. 4.

Зовнішній вид шунта вимірювального (розробник О. С. Недзельський) представлений на рис. 14, а метрологічні характеристики – в табл. 4. ШКИ-300 конструктивно складається з вимірювального резистора (ВР), що підключається в розрив розрядного ланцюга випробувальної установки, кабельної лінії (КЛ) і блоку навантаги узгоджувальної (БНУ).



*Рис. 13. Зовнішній вид ИНМП-2С з кабельною лінією передачі інформації  
 1 – індукційний вимірювальний перетворювач; 2 – вимірювальний кабель;  
 3 – RC-інтегратор; 4 – осцилограф*



*Рисунок 14. Зовнішній вид ШКИ-300*

Кабельна лінія (КЛ) призначена для передачі сигналу від ВР до осцилографа. КЛ є кабелем типу РК75-4-13 довжиною 10 м, покладений в металеву плетінку ПМЛ-10×6 (для підвищення завадозахищеності). На кінцях КЛ встановлені вилки роз'єму типу СР75-154ПВ і СР50-74ПВ. Для узгодження КЛ на його виході включають блок навантаги узгоджувальний (БНУ), який підключається до входу осцилографа. З боку підключення КЛ і ВР до металевого обплетення приєднаний відвід з кабельним наконечником, який приєднується до заземленого електрода ВИХІД ВКР.

Реєстрація сигналів здійснювалася одночасно двома цифровими запам'ятовувальними осцилографами TDS 2014В (смуга пропускання 200 МГц) і TDS 1012 (смуга пропускання 100 МГц). Необхідність рознести осцилографи в екрановану кабінку і пультову, пов'язана з тим, що обплетенням кабельних ліній протікають струми, що впливають один на одного при їх паралельному розташуванні на великій довжині укладання ( $\geq 5$  м).

*Таблиця 4. Основні метрологічні і конструктивні характеристики ЗВТ для вимірювання імпульсних магнітних полів та сили струму*

Назва характеристики	Одиниця вимірювання	Тип ЗВТ	
		ИНМП-2С	ШКИ 300
Амплітудний діапазон	А/м кА	10-10000 -	- 300
Коефіцієнт перетворення	В/(А/м)	$0.35 \times 10^{-3}$	-
Активний опір	Ом	-	$2,52 \times 10^{-4}$
Час наростання перехідної характеристики	нс	500	60
Стала часу спаду перехідної характеристики	мс	100	1000*
Амплітудна похибка	%	5	2
Габарити вимірювального перетворювача (діаметр x висота)	мм	200x20	Діаметр 100 Висота 40
Вага вимірювального перетворювача	кг	0.2	0,6

**Примітка:** \* тривалість обмежена температурним режимом.

ИНМП-2С встановлювався в точках з координатами, зазначеними в табл. 3, для вимірювання фактичного значення напруженості магнітного поля. Під час проведення випробувань ОВТ за допомогою шунта ШКИ-300 контролювалася сила струму в полеутворюючій системі, що гарантувало контроль стабільності параметрів струму та залежність амплітуди імпульсу напруженості магнітного поля тільки від відстані уздовж лінії Line 1. Амплітуда сили струму визначається величиною зарядного напруги, що подається на ГІС від ПВП- 2. Ця напруга встановлювалося рівною 26 кВ для всієї серії випробувань.

Осцилограми напруженості імпульсного магнітного поля в точках, де встановлювалося ОВТ, представлені на рис. 11. Як приклад, далі наведено розрахунок напруженості компоненти  $H_z$  магнітного поля в точці  $h_{1,5м}$ . Осцилограма, отримана з використанням ИНМП-2С, представлена на рис. 15

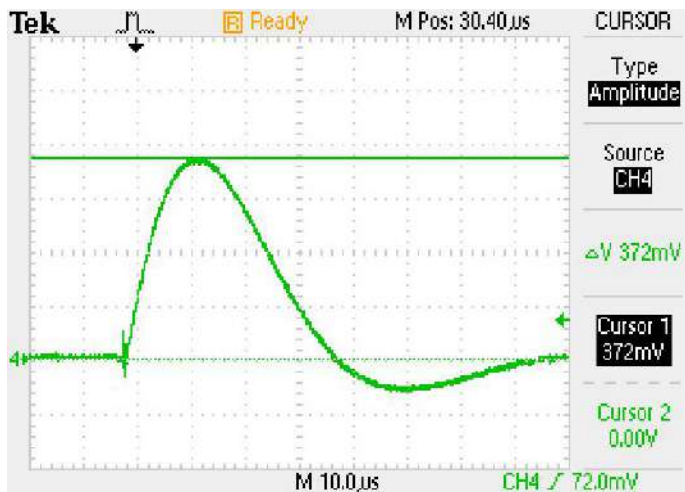


Рисунок 15. Осцилограма напруженості компоненти  $H_z$  магнітного поля в точці  $h_{1,5 м}$

Розрахунок напруженості магнітного поля здійснюється так: максимальне значення напруги 0,372 В ділиться на коефіцієнт перетворення ИНМП-2С рівний  $0.35 \times 10^{-3} \text{ В} \cdot \text{А}^{-1} \text{ м}$  (див. табл. 3), виходить значення 1063 А/м. Деяка відмінність

від усередненого значення напруженості (+1074 А/м), представленого в табл. 3, обумовлена похибкою ( $\pm 2\%$ ) установки зарядної напруги ГПС в процесі подачі серії імпульсів струму. Вплив кабельної лінії передачі інформації враховано в процесі калібрування ИНМП-2С.

Для порівняння осцилограми напруженості магнітного поля з осцилограмою струму в полеутворюючому вітку, на рис. 16 представлена осцилограма струму у контурі (отримано за допомогою осцилографа TDS 1012).

Розрахунок сили струму за осцилограмою здійснюється так: максимальне значення напруги 6,64 В ділиться на опір шунта 0,252 мОм (див. табл. 3), виходить значення 26,35 кА. Час наростання (0,1-0,9) 8,555 мкс (дивись друге зверху справа значення на рис. 16). Ширина імпульсу на половині максимального значення 25,92 мкс (дивись третє зверху справа значення).

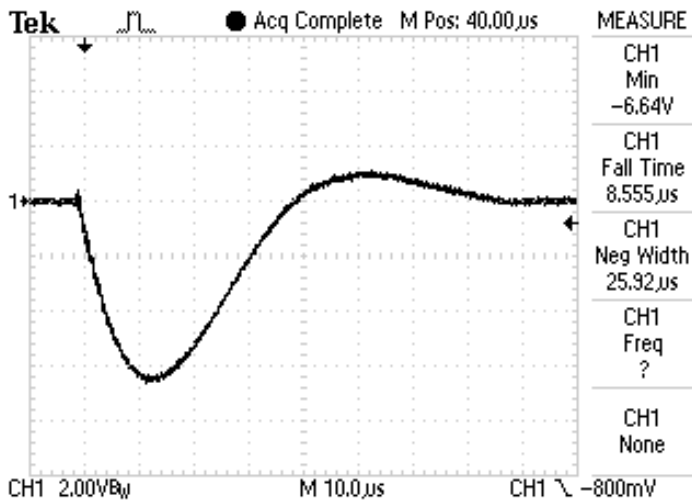


Рисунок 16. Осцилограма струму у витку

### Розробка та створення імітатора за використання полозкової лінії

Генератор імпульсів струму ГІТ 100/70, було зміщене максимально близько до полозкової системи з двох пластин та приєднане мідними стрічками. Протилежний кінець полозкової лінії з'єднане мідною стрічкою (коротке

замикання). Для вимірювання параметрів імпульсного магнітного поля застосовано датчик ИНМП-2С. Зовнішній вид випробувального стенду представлено на рис. 17.



*Рисунок 17. Зовнішній вид випробувального стенду NL254-H-2  
1 – генератор імпульсних струмів; 2 – полеутворююча система з двох  
пластин; 3 – датчик магнітного поля ИНМП-1*

Зображення датчика магнітного ИНМП-2С поля встановленого у центральну точку робочого об'єму NL254-H-2 представлено на рис. 18. Датчик магнітного поля ИНМП-2С за результатами калібрування має коефіцієнт перетворення

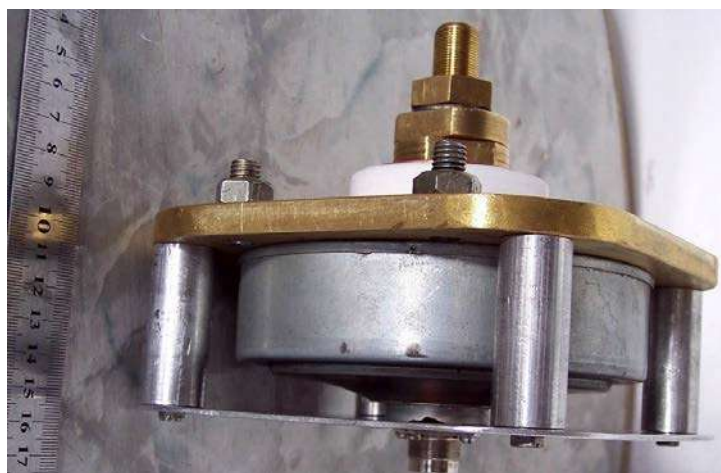
$$K_p = 0,35 \cdot 10^{-3} \text{ В/(А/м)}.$$

Для реєстрації параметрів струму, що протікає по системі, застосовано шунт ШИ 200, зовнішній вигляд якого представлено на рис. 19. Опір шунта ШИ 200 дорівнює  $2,9 \cdot 10^{-4} \text{ Ом}$ .



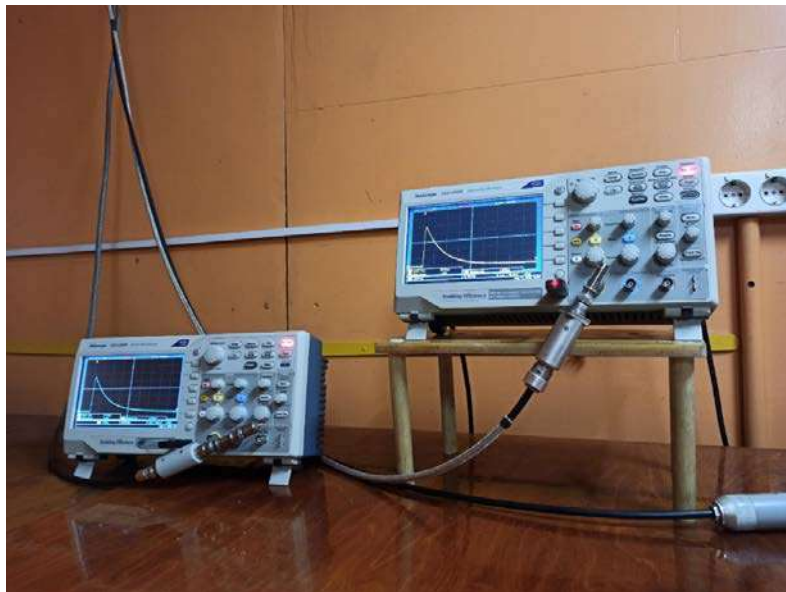
*Рисунок 18. Датчик магнітного поля встановлений у центральну точку  
робочого об'єму NL254-H-2*

*1 – перетворювач магнітного поля індукційного типу; 2 – кабельна лінія  
передачі інформації; 3 – ізоляційна немагнітна стійка зі склопластика*



*Рисунок 19. Зовнішній вигляд шунта ШИ-200*

Для реєстрації параметрів імпульсу магнітного поля використовується комплект цифрових запам'ятовуючих осцилографів, розташованих в екранованому бункері, як представлено на рис. 20.



*Рисунок 20. Комплект цифрових запам'ятовуючих осцилографів, розташованих в екранованому бункері*

З метою оптимізації об'єму експериментальних досліджень щодо визначення розмірів простору, в якому ступень нерівномірності напруженості магнітного поля не перевищує 5 % та 10%, проведено відповідне математичне моделювання (С.І. Мельник). Для розрахунків магнітного поля, що генерується токами, у пакеті Comsol Multiphysics передбачено декілька різних модулів, зокрема:

- Magnetic Fields (mf)
- Magnetic and Electric Fields (mef)
- Electromagnetic Waves, Transient (tewt), та інші.

За результатами аналізу особливостей застосування вказаних модулів для моделювання процесу, який розглядається, визначено, доцільним використання модулю Electromagnetic Waves, Transient (tewt). Інтерфейс Electromagnetic Waves, Transient (tewt) вирішує задачу з поширенням хвиль в часовій області. Джерела поля можуть бути задані у вигляді точкових диполів, лінійних струмів або зовнішніх полів на границях або в областях. Він використовується в основному для моделювання поширення електромагнітних хвиль в різних середовищах і структурах, коли потрібно рішення в часовій області – наприклад, несинусоїдальні сигнали або нелінійні середовища. Типові програми включають поширення електромагнітних імпульсів і генерацію гармонік в нелінійно-оптичних середовищах.

У цьому інтерфейсі співвідношення

$$\mu \mathbf{H} = \nabla \times \mathbf{A} \quad \text{и} \quad \mathbf{E} = -\partial \mathbf{A} / \partial t \quad (1)$$

використовують калібрування векторного потенціалу, при якому скалярний потенціал електромагнітного поля стає нульовим. Це робить можливим переписати рівняння Максвелла-Ампера, використовуючи тільки векторний (магнітний) потенціал поля

$$\mu_0 \sigma \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} + \mu_0 \frac{\partial}{\partial t} \varepsilon \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} + \nabla \times (\mu_r^{-1} \nabla \times \mathbf{A}) = 0 \quad (2)$$

де  $\mu_0$  – абсолютна магнітна проникненість вакуума, Гн/м;

$\mu_r$  – відносна проникненість;

$\sigma$  – удельная електрична провідність, См/м;

$\varepsilon$  – діелектрична проникненість, Ф/м;

$\mathbf{A}$  – векторний потенціал, Вб/м;

$t$  – час, с.

Це рівняння підходить для моделювання несинусоїдальних сигналів. Використовуючи співвідношення

$$\varepsilon r = n^2, \quad (3)$$

де  $n$  – показник заломлення,

можна в якості альтернативи записати (2) у вигляді (4):

$$\mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial}{\partial t} \left( n^2 \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} \right) + \nabla \times (\nabla \times \mathbf{A}) = 0 \quad (4)$$

### ***Граничні умови моделі***

Моделювання тонких металевих пластин пов'язано з витратою великих обчислювальних ресурсів. Крім того, необхідність вибору малого розміру клітинок розрахункової сітки кінцевих елементів вимагає надмірно великого обсягу машинної пам'яті. У зв'язку з цим при чисельному моделюванні поширення електромагнітних хвиль і струмів в подібних об'єктах модель істотно спрощують, замінюючи тонкі шари двовимірними поверхнями з розподіленими електрофізичними параметрами.

У використовуваному модулі Electromagnetic Waves, Transient (tewt) є можливість заміни об'ємного розподілення струму в приповерхневих областях об'єктів граничними умовами The Perfect Electric Conductor:

$$\mathbf{n} \times \mathbf{E} = 0, \quad (5)$$

де  $\mathbf{n}$  – одиничний вектор, перпендикулярній поверхні (орт);

$\mathbf{E}$  – тривимірний вектор напруженості електричного поля.

У побудованій моделі ці умови задане на верхній та нижній пластині зони полеутворення. Задля виключення викривлень поля на границях розрахункової області, задане її у вигляді сфери. На границях сфери задане граничні умови відсутності віддзеркалення (прозорості для розсіяної хвилі) – Scattering Boundary Condition. Для плавності розподілу використане додатковий сферичний шар. На усіх інших границях задані граничні умови безперервності електромагнітного поля з урахуванням властивостей матеріалів.

Для розрахункової оцінки амплітудно часові параметри імпульсу струму з виходу генератору задані такими: форма імпульсу 4,0/50,0 мкс; максимальне значення 10 кА.

Загально визнаним способом моделювання такого імпульсу є його аналітична апроксимація у вигляді комбінації двох затухаючих експонент:

$$I(t) = k_1 * (\exp(-a1 * t) - \exp(-b1 * t)) \quad (6)$$

Використовуючи програму побудови графіків аналітичних функцій «desmos», знайдено параметри апроксимації (6) що відповідають вказаним часовим параметрам:  $a_1=15600$ ;  $b_1=10^6$ ;  $k_1 = 10850$ .

Для моделювання імпульсу струму у моделі передбачено 3 ідеальних провідника. На кожному з них за допомогою інструменту Edge Current задаємо однакові значення імпульсу струму, що відповідають апроксимації (6) відповідно до рис. 21.

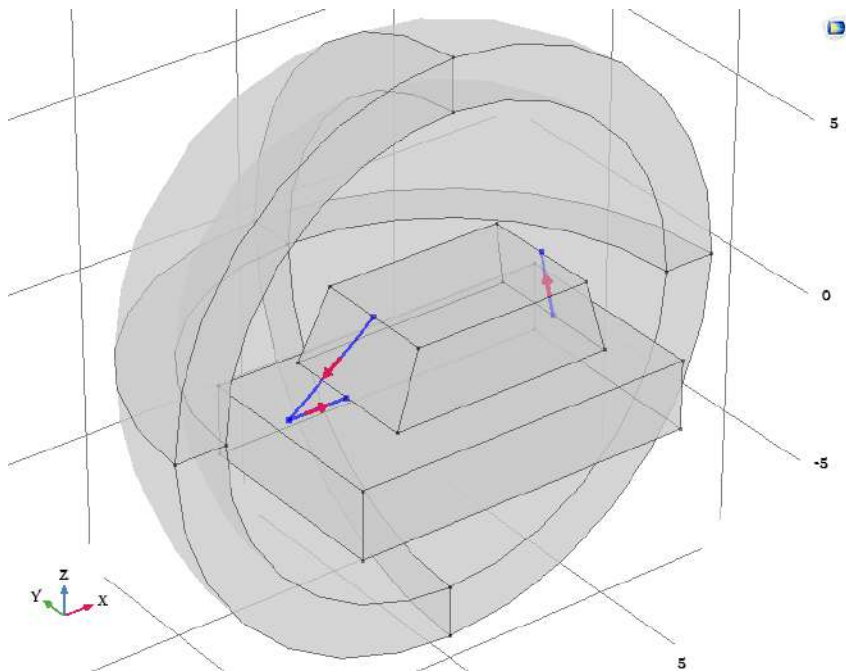
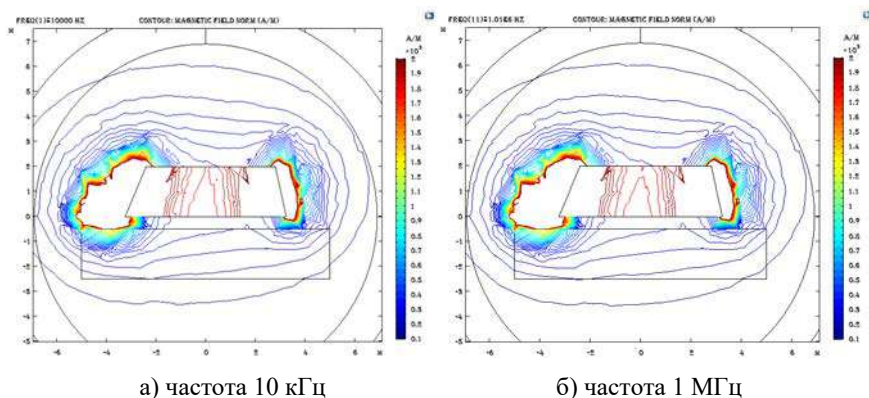


Рисунок 21. Моделювання імпульсу струму у квазістаціонарному наближенні

Зазначимо, що така модель відповідає квазістаціонарному наближенню характеру розповсюдження поля у системі. Попередні оцінки показали, що відхиленням від реального розподілу поля при таких параметрах імпульсу можна знехтувати.

Так, наприклад, характерну смугу частот імпульсу із заданими часовими характеристиками можна оцінити як 0.01-1МГц. На границях цієї смуги розподілення напруженості магнітного поля майже не відрізняються (рис. 22). Тому похибками, що виникають за рахунок квазістаціонарного наближення при розрахунку відгуку на імпульс струму можна знехтувати.



*Рисунок 22. Розподілення напруженості магнітного поля на границях смуги частот 0.01-1 МГц при однаковій амплітуді струму*

Максимальний (фізично контрольований) розподіл кліток розрахункової сітки (Extremely fine) на моделі має такі параметри:

- Complete mesh consists of 1098584 domain elements, 44178 boundary elements, and 1293 edge elements.

Час розрахунку при такому розбитті на РС з об'ємом оперативної пам'яті 16 ГГб із процесором Intel i7 складає декілька годин. Для прискорення процедури корекції моделі та одержання проміжних результатів, а також ілюстративних зображень було використано менш детальне розбиття (Normal – рис. 23). Його параметри:

- Complete mesh consists of 8946 domain elements, 2284 boundary elements, and 288 edge elements.

Час розрахунку при такому розбитті складає 10-20 хвилин.

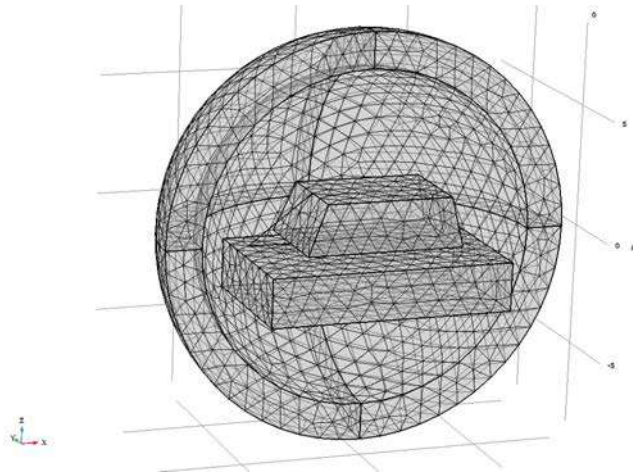


Рисунок 23. Фізично контрольований розподіл клітинок розрахункової сітки на моделі рівня (Normal)

Для перевірки адекватності моделі та більшої наочності результатів обчислень одержане розподіл щільності поверхневого струму на металевих поверхнях системи. Зображення цих розподілів наведено на рис. 24. Різниця у характері розподілу струмів на верхній та нижній пластині обумовлена їх різницею у розмірах, розташуванні та підключенні до лінійних провідників зі струмом.

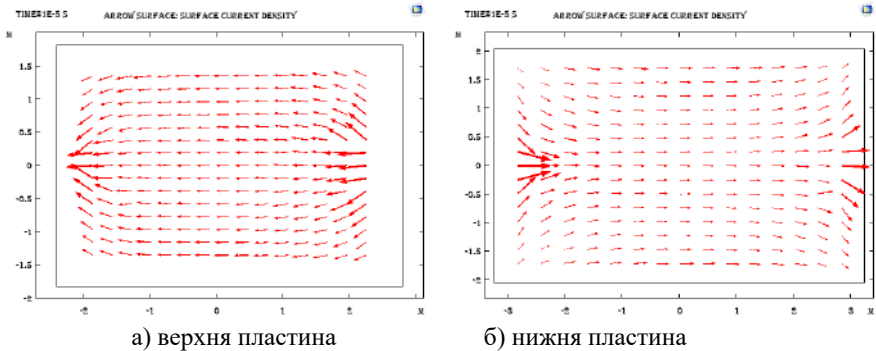
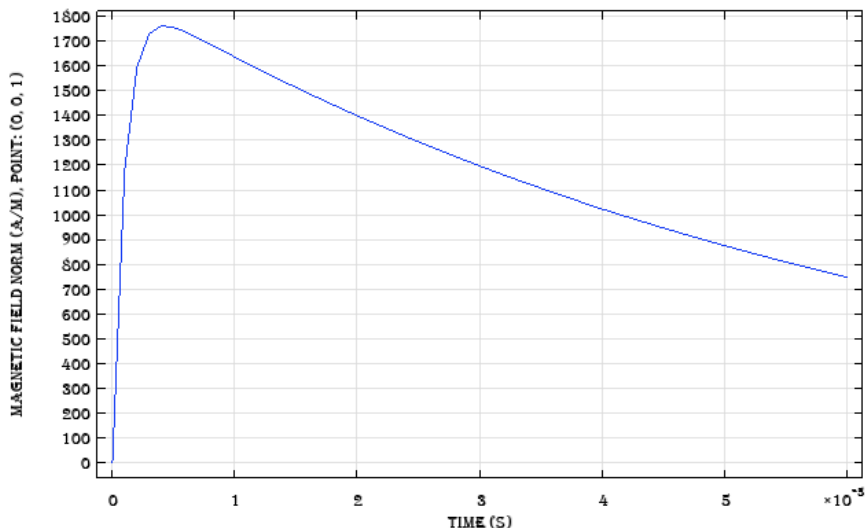


Рисунок 24. Лінії поверхневого струму на металевих поверхнях системи

Часову залежність напруженості магнітного поля визначено у геометричному центрі системи, наведено на рис. 25.



*Рисунок 25. Часова залежність напруженості магнітного поля у геометричному центрі системи*

Ще раз слід відзначити, що часова залежність напруженості магнітного поля повністю співпадає із часовою залежністю сили струму в імпульсі. Це означає, що припущення про можливість квазістаціонарного наближення було вірним.

У табл. 5 наведено значення напруженості магнітного поля у перші 8 мікросекунд після включення імпульсу струму для відстані між пластинами 2 м. Як слід очікувати, найбільше значення швидкості наростання напруженості є у першу мікросекунду. Воно сягає значення  $1,18 \cdot 10^9 \text{ Ам}^{-1}\text{с}^{-1}$ , що приблизно удвоє менше за очікуване. Враховуючи на те, що це усереднене за першу мікросекунду значення, можна вивести, що потрібне значення відповідає середньому за перші 0.3 мікросекунди.

Таблиця 5. Напруженість магнітного поля та швидкість його наростання у перші 8 мікросекунд після включення імпульсу струму

$t$ , мкс	$H_Y, \text{Ам}^{-1}\text{с}^{-1}$	$dH/dt, \times 10^9 \text{Ам}^{-1}\text{с}^{-1}$
1	1180	1,180
2	1596	0,416
3	1731	0,135
4	1763	0,032
5	1757	-0,006
6	1738	-0,019
7	1714	-0,024
8	1688	-0,026

Проведено розрахунки та відображено двомірні графіки розподілу відносного максимального значення напруженості магнітного поля по вертикальних та горизонтальних перерізах простору для кожного з обраних значень відстані між пластинами. В якості базового значення визначено значення напруженості магнітного поля у геометричному центрі полозкової системи. Діапазон відстані між пластинами від 0,5 м до 4,0 м пройдено з кроком 0,5 м. Додатково розраховано розподіл у просторі максимального значення похідної від напруженості магнітного поля. Визначено зони однорідності  $\pm 5\%$  та  $\pm 10\%$ . Далі, для ілюстрації на рис. 26 та 27 наведено результати для відстані між пластинами 2 м, що обране за базовий варіант реалізації випробувань зразків бортового обладнання, яке зазвичай має максимальний габаритний розмір не більш ніж 0,6 м.

У табл. 6 наведено результати визначення розмірів робочого об'єму, з максимальним відхилом 5 % та 10%. Розміри виміряні по ізолініях у наведених рисунках, похибка  $\pm 0.02\text{м}$ .

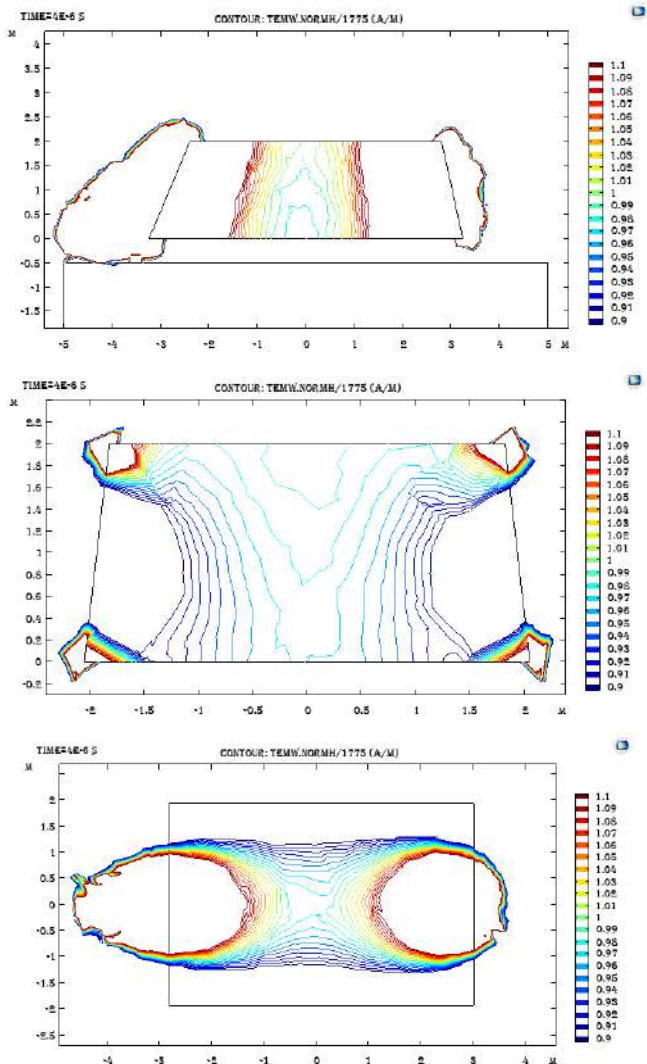


Рисунок 26. Розподіл напруженості магнітного поля відносно його максимального значення у центральній точці системи (діапазон відхилення  $\pm 10\%$ )

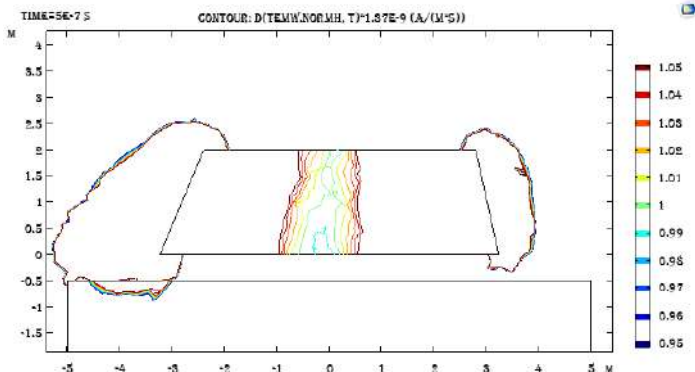


Рисунок 27. Розподіл швидкості наростання напруженості магнітного поля відносно його максимального значення у центральній точці системи у перерізі площиною (XZ), (діапазон відхилення  $\pm 10\%$ )

Таблиця 6. Розміри робочого об'єму в залежності від допустимого відхилу напруженості магнітного поля

h, m	Відхил, %	$\Delta X, m$	$\Delta Y, m$	$\Delta Z, m$
1.0	$\pm 5\%$	0.85	1.00	-
	$\pm 10\%$	1.18	1.45	-
1.5	$\pm 5\%$	0.95	0.90	-
	$\pm 10\%$	1.20	1.34	-
2.0	$\pm 5\%$	0.98	0.75	-
	$\pm 10\%$	1.27	1.15	-
2.5	$\pm 5\%$	0.98	0.75	-
	$\pm 10\%$	1.28	1.12	-
3.0	$\pm 5\%$	0.95	0.72	3.00
	$\pm 10\%$	1.22	1.10	-
3.5	$\pm 5\%$	0.83	0.77	2.80
	$\pm 10\%$	1.13	1.07	3.50
4.0	$\pm 5\%$	0.82	0.75	3.00
	$\pm 10\%$	1.13	1.07	4.00

**Примітки:**

- Знак «-» у таблиці означає, що неоднорідність поля в усьому об'ємі між пластинами менше зазначеної.
- Відхилення напруженості визначено по відношенню до напруженості магнітного поля у точці геометричного центру полеутворюючої системи.
- Вісь «X» – вдовж лінії, вісь «Y» – поперек горизонтальна, вісь «Z» – поперек вертикальна. Центр координат розташовано на нижній площині.

За результатами математичного моделювання зроблено такі висновки.

- Динаміка розповсюдження електромагнітного імпульсу у системі відповідає квазістаціонарному наближенню. Тому розподіл напруженості магнітного поля в об'ємі між пластинами у відносних одиницях не залежить від часу.
- Зона однорідного поля формується у центральній частині системи та спотворюється по мірі наближення до її країв. Тому характерні розміри зони однорідності з 10%-м відхиленням більші за розміри зони з 5 % відхиленням приблизно в 1,2 рази.
- Характерні розміри зони однорідності з 10%-м відхиленням майже не залежать від відстані між пластинами та становлять приблизно:
  - 30 % по довжині (ось  $X$ );
  - 55 % по ширині (ось  $Y$ );
  - 100 % по висоті (ось  $Z$ ).
- Максимальне значення напруженості магнітного поля у центральній точці системи відповідає моменту максимальної амплітуди імпульсу струму та залежить від відстані між пластинами, як представлено у табл. 7.
- Швидкість наростання напруженості магнітного поля має максимальне значення у началі імпульсу  $T_0$ .
- Завдяки квазістаціонарному наближенню можна вважати, що максимальне значення швидкості наростання напруженості магнітного поля пропорційне максимальному значенню самої напруженості.
- Коефіцієнт пропорційності (усереднений по набору відстаней між пластинами) становить  $4 \cdot 10^5$  (с<sup>-1</sup>). Згідно цього коефіцієнту заповнена третя колонка табл. 7 щодо максимальної швидкості наростання.
- При зміні значення максимальної амплітуди імпульсу струму всі одержані результати змінюються пропорційно. Для досягнення потрібного значення швидкості наростання магнітного поля потрібно подання у систему утворення поля імпульсу струму силою примірно 22 кА.

Таблиця 7. Значення напруженості магнітного поля в центральній точці для струму з максимальною амплітудою 10 кА

Відстань між пластинами (м)	Максимальна напруженість магнітного поля у центральній точці (А/м)	Швидкість наростання напруженості магнітного поля у центральній точці у момент 0.5 мкс ( $10^9 \frac{A}{m \cdot c}$ )
1.0	2020	0.81
1.5	1875	0.75
2.0	1775	0.71
2.5	1665	0.67
3.0	1565	0.63
3.5	1475	0.59
4.0	1400	0.56

Верифікацію вихідних параметрів експериментального зразка установки з двома пластинами для випробувань за видом NL254-H проведено із застосуванням штатних засобів вимірювальної техніки: датчику магнітного поля ИНМП-2С (коефіцієнт перетворення  $0,35 \cdot 10^{-3}$  В/(А/м), шунт дисковий ШД-200, цифрові запам'ятовуючі осцилографи, відповідно до матеріалів підрозділу 3. Під час експериментальних досліджень датчик магнітного поля був розташований у центрі полеутворюючої системи, на висоті 1 м за проміжку між пластинами 2 м, як показано на рис. 18. Відповідні осцилограми представлено на рис. 28-29. Одночасно зафіксовані осцилограми струму, який формує магнітне поле, які представлено на рис. 29-30.

За результатами експерименту співвідношення між силою струму та напруженістю магнітного поля у центральній точці робочого об'єму при проміжку між пластинами 2 м, складає  $178,56 \text{ А} \cdot \text{м}^{-1} \text{ кА}^{-1}$ . За результатами розрахунку це значення дорівнює  $177,5 \text{ А} \cdot \text{м}^{-1} \text{ кА}^{-1}$ . Отже, розбіжність складає менш ніж 1%, що знаходиться у межах невизначеності результатів вимірювання.

Таким чином, для досягнення заданої в табл. 1 швидкості наростання напруженості магнітного поля у визначеній точці часу 0,5 мкс ( $1,0 \cdot 10^{11} : 62,8 =$

$1,59 \cdot 10^9 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{c}^{-1}$ ), враховуючі відповідні дані у табл. 7 ( $0,71 \cdot 10^9 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{c}^{-1}$ ), потрібно збільшити силу струму до 22,4 кА. Очевидно, що за таких умов, вимоги стандартів [2, 4] буде виконано повною мірою.

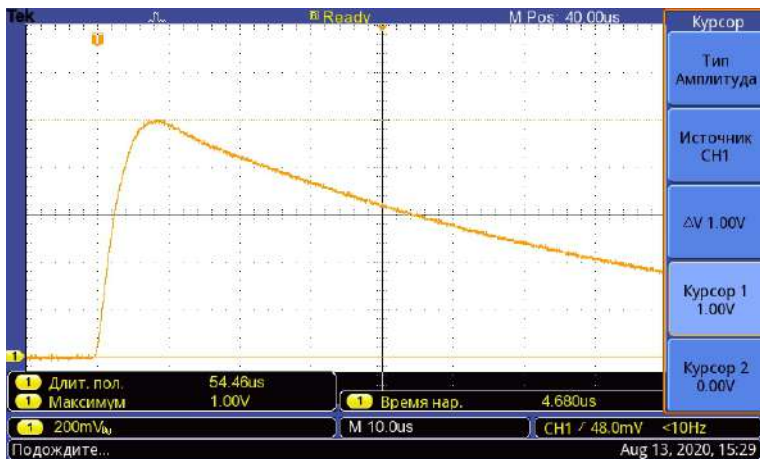


Рисунок 28. Амплітуда сигналу з датчика за курсорами – 1 В, що відповідає напруженості магнітного поля  $H = 2857 \text{ A/m}$

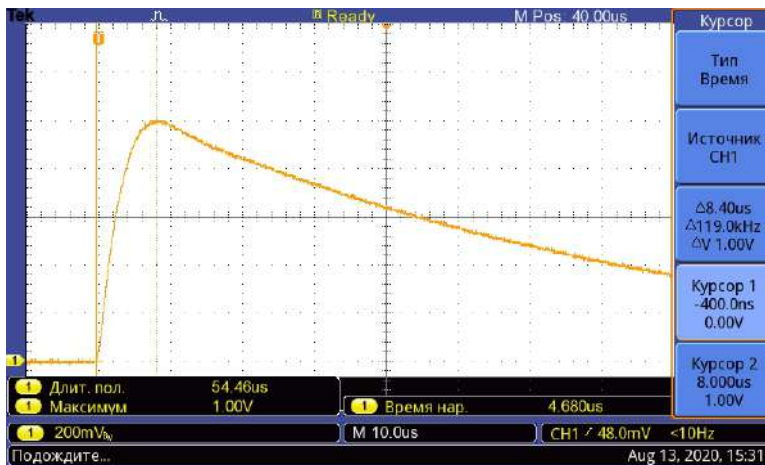


Рисунок 29. Час досягнення максимуму амплітуди  $T_{\text{макс}} = 8,4 \text{ мкс}$ , тривалість напівспаду  $T_{\text{имп}} = 56,8 \text{ мкс}$ .

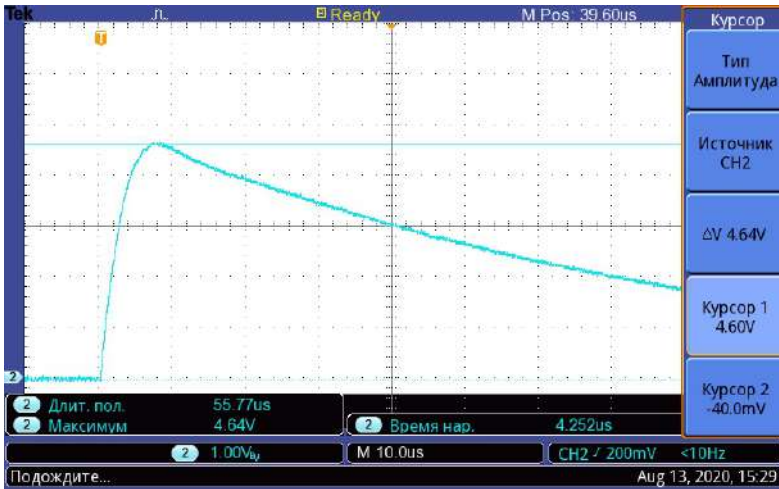


Рисунок 30. Амплітуда напруги сигналу з шунта ШД-200 за курсорами – 4,64 В, що відповідає силі струму  $I = 16 \text{ кА}$



Рисунок 31. Час досягнення максимуму амплітуди  $T_{\text{макс}} = 8 \text{ мкс}$ , тривалість напівспаду  $T_{\text{имп}} = 60 \text{ мкс}$

## ВИСНОВКИ

Апробовано два варіанти реалізації установок для утворення імпульсного магнітного поля з параметрами, які відповідають вимогам стандартів [2, 4].

Одержані результати математичного моделювання співпадають з результатами фізичного експерименту з розбіжністю 1 %, що знаходиться у межах невизначеності (3%) результатів експерименту.

При застосуванні варіанту з двома пластинами у систему потрібно інжектувати струм силою примірно 22 кА.

Розміри зони напруженості магнітного поля при відстані між платинами 2 м з відхиленням не більш ніж  $\pm 10$  % (що відповідає вимогам стандартів) становлять 1,27x1,15x2,0 м<sup>3</sup>. Цього об'єму достатньо для випробувань бортового обладнання ОВТ, перш за все електричних детонаторів.

## ПОДЯКА

Автор висловлює подяку усім фахівцям, які приймали участь у реалізації досліджень, особливо таким: П. М. Мельнікову, О. Ю. Чернухину, Л. В. Носко за реалізацію експериментальних досліджень, С. І. Мельніку, С. П. Шаламову за математичне моделювання.

Представлені результати є частиною науково-дослідної роботи (ДР №0115U000611, науковий керівник В. В. Князев), яку здійснено у рамках замовлення Міністерства освіти і науки України у 2019-2020 роках.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. MIL STD 461G:2011 Department of Defense Interface Standard – Electromagnetic Interference and test methods for Aircraft. – 269 p.
2. MIL STD 464C:2010 Electromagnetic environmental effects. Requirements for systems. – 165 p
3. STANAG 4370 AECTP 500:2016 Electromagnetic environmental effects test and verification. NATO Standardization Agency, 2016.-1125 p.

4. STANAG 4370 NATO АЕСТР 250:2014 NATO Standard Electrical and Electromagnetic Environmental Conditions. Edition C Version1, December 2014.- 253р.

5. Князев В. В. Випробування зразків озброєння та військової техніки за параметрами електромагнітної сумісності / В. В. Князев // Стандартизація, сертифікація, якість. №2, 2020.- С.21-27.

6. DEF STAN 59-411 Part 3:2019, Electromagnetic Compatibility – Part 3: Test Methods and Limits for Equipment and Sub Systems (UK Defence Standard), 248 p.

7. Князев В. В. Створення експериментального зразка установки для реалізації випробувань імпульсним електричним полем що супроводжує блискавку / В. В. Князев, П. М. Мельніков, О. Ю. Чернухін // Вісник НТУ «ХП» Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. № 27 (1352). 2019, №27, С. 33-39.

8. Test Operations Procedure (TOP) 1-2-511A Electromagnetic Environmental Effects System Testing / US Army White Sands Missile Range NM 88002-5178, 2013. 224 p.

# ФУНКЦІОНАЛЬНІ ПОКРИТТЯ В ІНЖЕНЕРІЇ ПОВЕРХНІ ДЕТАЛЕЙ СИЛОВИХ УСТАНОВОК АВТОМОБІЛЬНОЇ ТА БРОНЕТАНКОВОЇ ТЕХНІКИ

*Каракуркчі Г. В., Сахненко М. Д., Майба М.В., Горохівський А. С.*

## **Вступ**

Металоксидні системи є одним із класів каталітичних матеріалів, що використовуються в екотехнологіях та екологічному каталізі зокрема. Такі матеріали мають високу каталітичну активність за рахунок поверхневої неоднорідності хімічного складу та поверхневої локалізації хімічних сполук різної природи [1]. Також вони тривалий час зберігають працездатність в умовах дії високих температур і тиску, що загалом притаманно процесам нейтралізації токсичних агентів, а високі показники корозійної тривкості, механічної міцності забезпечують тривалий термін їх експлуатації.

Одним із способів одержання таких систем на вентильних металах, зокрема сплавах алюмінію, є метод плазмо-електролітного оксидування (ПЕО), що за сутністю представляє собою електрохімічне формування анодних оксидних шарів при потенціалах іскріння та пробую [2]. Під час оксидування поверхні в лужних електролітах при високій напрузі формуються композитні гетерооксидні покриття, що складаються з оксидної матриці металу-носія (основного металу), в яку інкорпоровані оксиди металів-допантів. Серед переваг метода можна відзначити відносну простоту технології; можливість формування в одну стадію матриці металу-носія та безпосередньо каталітично активного шару; керування властивостями поверхневих оксидних шарів за рахунок варіювання складу робочих електролітів та режимів ПЕО; формування покриттів на виробках складної форми [3].

Важливим аспектом технології синтезу таких систем є природа носія, який слугує платформою для каталітичного шару. Проведений аналіз способів одержання ПЕО-покриттів на сплавах Al та Ti виявив ряд проблемних питань щодо формування суцільного оксидного шару із рівномірним розподілом

активного компоненту на легованих сплавах через наявність значної кількості легувальних елементів [4], оксиди яких відрізняються хімічними властивостями і питомим електричним опором, зокрема, на сплавах системи Al-Si.

В роботі представлено результати дослідження особливостей плазмо-електролітного оксидування сплавів алюмінію системи Al-Si (силумінів) із різним вмістом кремнію з формуванням гетерооксидних покриттів  $Al_2O_3 \cdot CoO_x$ .

### **Закономірності формування покриттів на поршневих сплавах із різним вмістом кремнію**

Для досліджень були використані зразки силумінів АК21 та АЛ30, склад яких відповідає ГОСТ 1583. Покриття формували в гальваностатичному режимі методом ПЕО за густини струму 3–10 А/дм<sup>2</sup> з використанням лабораторної установки, яка містила електрохімічну комірку з охолодженням електроліту до 20–25°C та примусовим перемішуванням, стабілізоване джерело постійного струму Б5-50, робочі електроди. Співвідношення  $S_{\text{анода}} : S_{\text{катода}}$  складало 10:1.

У попередніх дослідженнях було доведено ефективність використання лужних електролітів на основі дифосфатів для формування на їх поверхні гетерооксидних покриттів із перехідними металами [5]. Саме ці розчини були обрані для формування покриттів на досліджуваних сплавах (табл. 1).

*Таблиця 1. Склад електролітів для досліджень*

Номер електроліту	Співвідношення компонентів	Состав, моль/дм <sup>3</sup>	
		K <sub>4</sub> P <sub>2</sub> O <sub>7</sub>	CoSO <sub>4</sub>
1	8:1	0,4	0,05
2	4:1	0,4	0,1
3	3:1	0,6	0,2

ПЕО зазначених зразків силумінів на їх поверхні одержано оксидні покриття, що можна визначити за зміною морфологічних характеристик електродів (рис. 1).

Аналіз кінетичних закономірностей оксидування досліджуваних сплавів (рис. 2) дозволив зробити висновок, що ПЕО означених матеріалів перебігає за

класичним механізмом із розділенням процесу обробки на характеристичні області відповідно до наявних модельних уявлень [6].

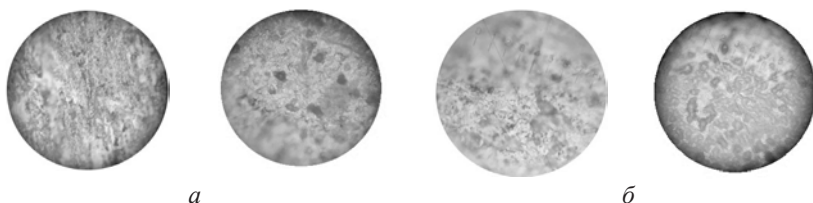


Рисунок 1. Поверхня сплавів АЛ30 (а) та АК21 (б) до та після ПЕО протягом 15 хвил. в електроліті 0,4 М  $K_4P_2O_7$ , 0,1  $CoSO_4$ . Збільшення  $\times 50$ .

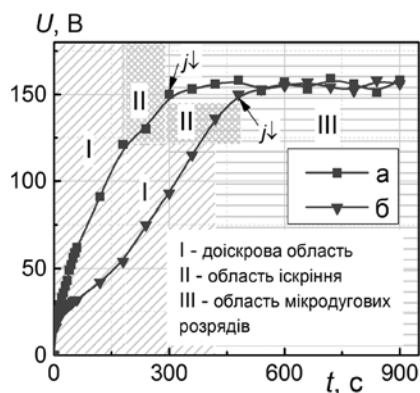


Рисунок 2. Формувальні залежності  $U-t$  плазма-електролітного оксидування в електроліті 2 силумінів: АЛ30 (а), АК21 (б). Час ПЕО 15 хвил.

Охарактеризувати зазначені області можна за показниками напруги ПЕО (табл. 2).

Таблиця 2. Параметри напруги під час ПЕО силумінів

Сплав Al	Напруга, В		
	$U_i$	$U_{мд}$	$U_{ф}$
АЛ30	120–125	145–150	150–155
АК21	130–135	145–150	150–155

Початковий етап анодування з інтенсивним газовиділенням та стрімким зростанням напруги (доіскрова область) змінюється областю іскріння при досягненні  $U_i = 120\text{--}135$  В. При напрузі  $145\text{--}150$  В процес переходить в область мікродугових розрядів, що візуалізується вигином залежності  $U\text{--}t$  та практично незмінним значенням  $U$ . Даний режим при незначних осциляціях напруги в межах та  $U_\phi = 150\text{--}155$  В є оптимальним для формування оксидного шару. Під час ПЕО досліджуваних зразків протягом 15 хв не спостерігався перехід процесу в область дугових розрядів, що характеризується різким падінням напруги оксидного шару та руйнуванням утвореного.

Аналіз ділянок одержаних залежностей в кожній із характеристичних областей дозволяє оцінити кінетичні закономірності процесу оксидування. Враховуючи те, що кристали кремнію у складі досліджуваних сплавів екранують оброблювану поверхню, кількісні параметри процесу обробки будуть залежати від його вмісту. Так, кут нахилу  $U\text{--}t$ -залежності для сплаву АК21 ( $\omega(\text{Si})$  21 мас. %) є меншим ніж для сплаву АЛ30 ( $\omega(\text{Si})$  11 мас. %). Тобто для виходу на режим іскріння сплаву із вищим вмістом Si необхідно більше часу, що пов'язано із етапом гомогенізації оброблюваної поверхні. Також  $U_i$  для сплаву із вищим вмістом основного легувального елементу є на 5 В більшою.

З урахуванням попередніх досліджень [7] було доведено ефективність застосування режиму «спадаючої потужності» для обробки сплавів складної структури. Тому зниження густини струму до  $j_2 = 3$  А/дм<sup>2</sup> після досягнення напруги іскріння ( $U_i$ ) для обох сплавів порівняно із початковою густиною струму ( $j_1 = 5$  А/дм<sup>2</sup>) сприяло переходу ПЕО у мікродуговий режим та формування покриття протягом 15 хвил. без переходу ПЕО у дуговий режим. Напруга мікродугового режиму та робоча напруга формування при використанні означеного підходу є однаковими. Втім, враховуючи різний час виходу на мікродуговий режим (різниця складає до 3 хв), можна очікувати меншу товщину синтезованого гетерооксидного покриття, а відтак і менший вміст допувального компоненту (кобальту) у його складі [8].

Відображенням трансформацій оброблюваної поверхні під час ПЕО є зміна морфології та складу поверхні окисданого матеріалу (рис. 3).

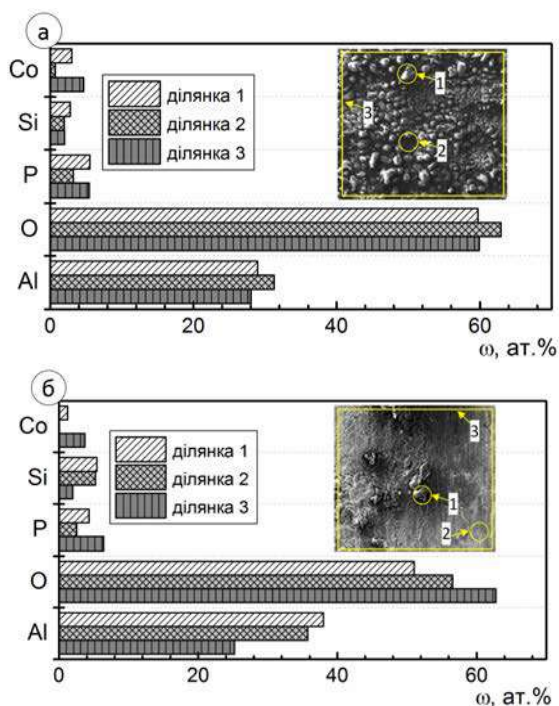


Рисунок 3. Склад та морфологія поверхневих шарів ПЕО-покриттів, на силумінах: АЛ30 (а), АК21 (б). Збільшення  $\times 1000$ .

Встановлено, що при ПЕО сплаву АЛ30 сформоване покриття є вельми рівномірним, що підтверджується даними СЕМ-аналізу (рис. 3 а). Для сплаву АК21 горіння розрядів відбувається лише на певних ділянках поверхні, але розряди є більш потужними та тривалими в часі, що ймовірно пов'язано із більшим вмістом Si. Тому за вказаний інтервал часу сформований оксидний шар (рис. 3 б) є нерівномірним.

Для аналізу елементного складу сформованих покриттів на одержаних мікрофотографіях (рис. 3) були виділені ділянки різної морфології: виступ (1) та упадина (2) покриття, а також усереднений вміст (3) на дослідженій поверхні.

Встановлено, що покриття на АЛ30 містить більшу кількість допувального компоненту (Со) як в середньому по поверхні, так і на кожній із досліджених ділянок. Вищий вміст Со на виступах покриття підтверджує припущення про його інкорпорацію за рахунок перебігу термохімічних реакцій в місцях горіння розрядів. Позитивним є те, що в упадинах покриття також встановлено його включення до 0,7 ат. %. Для АК21 вміст Со по поверхні є у 2 рази нижчим у порівнянні із АЛ30, причому покриття є нерівномірним за морфологією, а й за складом. І якщо на виступі покриття (ділянка 1) вміст Со сягає до 3,7 ат. %, на упадинах покриття (ділянка 2) його вміст дорівнює 0.

Окремим параметром контролю є вміст Si в синтезованому покритті. Для обох сплавів його вміст знижується у порівнянні із вихідним матеріалом у 4–5 разів. В той же час виявлення фосфору у складі поверхневих шарів також доводить факт інкорпорації компонентів електроліту у синтезований оксидний шар. Наявність зазначених елементів у складі покриттів є сприятливим для теплозахисних властивостей одержаного оксидного шару [9].

Таким чином, з використанням електроліту даного складу можна здійснювати ПЕО силумінів із формуванням кобальтовмісних покриттів, але його вміст є надто низьким. Тому доцільним є розробка способу ПЕО зазначених сплавів, збагачених кобальтом.

### **Параметри керування якісним та кількісним складом синтезованих покриттів**

Факторами впливу на якісні та кількісні характеристики синтезованих покриттів прогнозовано будуть співвідношення компонентів електроліту, густина струму та час плазмо-електролітного оксидування [10].

#### ***Вплив співвідношення компонентів електроліту***

Відомо, що активізація процесів ПЕО сплавів складної структури відбувається в розведених розчинах. В той же час, при збільшенні вмісту цільового допанту в електроліті, зростає ймовірність його інкорпорації до складу синтезованого покриття.

ПЕО проводили з використанням сплаву АК21 через вищий вміст кремнію та можливі ускладнення під час окисдування. Результати досліджень доводять, що ПЕО у дифосфатних електролітах із варійованим вмістом кобальту(II), в цілому є класичним. Час виходу на режим іскріння для досліджених електролітів збільшується з 2,5 до 13 хвилин при зменшенні вмісту  $\text{CoSO}_4$  в розчині та переході між співвідношенням концентрацій від 8:1 до 3:1. При цьому  $U_i$  варіюється в межах 120 – 125 В, а кінцева напруга формування – 145-160 В.

Аналіз складу синтезованих покриттів свідчить про утворення гетерооксидного шару, що містить компоненти електроліту, зокрема кобальт та фосфор (рис. 4). В досліджених умовах одержано покриття із вмістом каталітичного компоненту (Co) до 8,0 ат. % та фосфору до 7,0 ат. %.

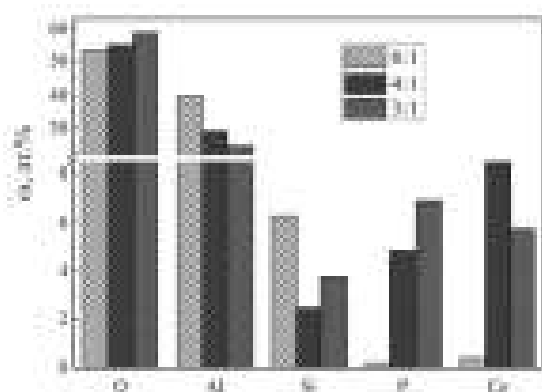


Рисунок 4. Склад ПЕО-покриттів  $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CoO}_x$  на АК21 при співвідношенні компонентів  $\text{K}_4\text{P}_2\text{O}_7 : \text{CoSO}_4$ , моль/дм<sup>3</sup>

Показано, що підвищення вмісту  $\text{CoSO}_4$  в електроліті сприяє збагаченню поверхневих шарів кобальтом з одночасним зменшенням вмісту в них Si [11]. Для досліджених робочих розчинів можна виявити наступні закономірності зміння складу одержаних оксидних покриттів, а саме: вміст кисню у покриттях поступово збільшується симбатно зі зменшенням вмісту алюмінію при переході від співвідношення 8:1 до 3:1.

У той же час вміст фосфору різко зростає при ПЕО в електролітах 2 та 3 порівняно із розведеним розчином. Зменшення вмісту кремнію у складі синтезованого покриття компенсується інкорпорацією Со під час хімічних та термохімічних реакцій. Покриття з найбільшим вмістом Со отримані з розчину при співвідношенні компонентів  $K_4P_2O_7 : CoSO_4 = 4:1$  ( $\square(CoSO_4) 0,1$  моль/дм<sup>3</sup>). Поверхнева концентрація Si при цьому зменшується у 10 разів та знаходиться на рівні лише 2,0 ат. %. Позитивним є те, що інкорпорація фосфору до складу синтезованого оксидного шару сприятиме підвищенню теплостійкості оксидованої поверхні, як зазначалося вище.

Варіювання співвідношення компонентів електроліту зумовлює також і трансформацію морфології та складу поверхні силуміну (рис. 5) під час ПЕО, що є відображенням кінетичних закономірностей утворення покриття.

Встановлено, що морфологія поверхневих шарів є відображенням хімічного складу синтезованих гетерооксидних покриттів [12]. В електроліті 1 протягом досліджуваного часу формується розвинена оксидна матриця основного металу ( $Al_2O_3$ ) (рис. 5 а), вміст кобальту та фосфору є мінімальними. В електроліті 2 (рис. 5 б) утворюється сфероїдно-мозаїчна поверхня, збагачена кобальтом, та включеннями фосфору. ПЕО в електроліті 3 (рис. 5 в) приводить до утворення кобальтовмісного покриття із значним вмістом оксидів фосфору, які вкривають основну частину оброблюваного зразка.

Оцінити рівномірність розподілу компонентів оксидного шару по поверхні зразка можна на підставі аналізу його складу на ділянках різної морфології, що візуалізовані на поверхні. Отримані результати свідчать, що вміст кобальту на виступах покриттів є вищим, ніж на упадинах (плато). Схожа закономірність визначена і для вмісту фосфору та кисню. Для розподілу алюмінію та кремнію по поверхні спостерігається зворотна залежність, тому що вони є основними складовими сплаву й природньо їх вміст в упадинах буде вищим, ніж у виступах синтезованого покриття. Аналіз складу оксидних систем вказує на нестехіометричне співвідношення кобальту та кисню, що буде сприятливим для перебігу редокс реакцій за участю кисню [13].

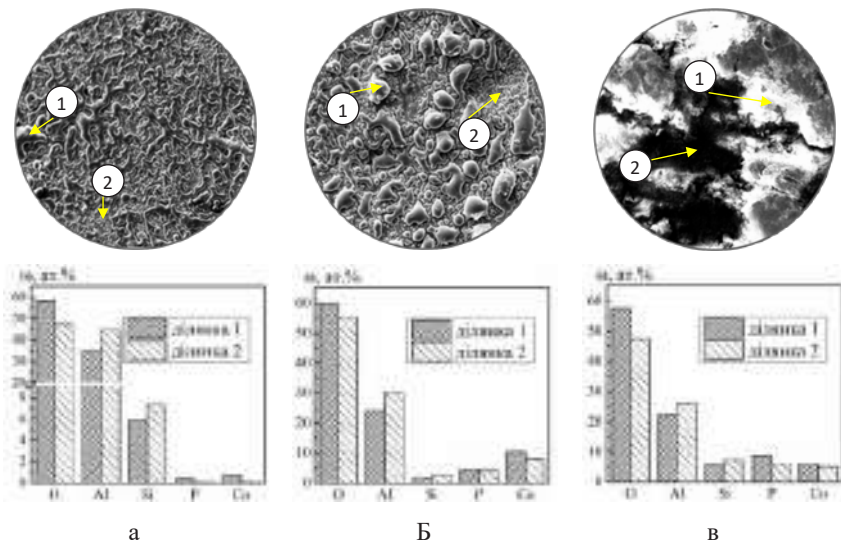


Рисунок 5. Морфологія покриттів  $Al_2O_3-CoO_x$  на АК21, синтезованих в електроліті при співвідношенні компонентів  $K_4P_2O_7 : CoSO_4$ , моль/дм<sup>3</sup>: 8:1 (а); 4:1 (б); 3:1 (в). Час ПЕО 20 хв. Збільшення  $\times 1000$

Таким чином можна зробити висновок, що для формування каталітичного покриття, збагаченого кобальтом доцільним буде використання електроліту № 2. У той час за необхідності одержання покриття із підвищеними теплозахисними властивостями (які визначаються вмістом кремнію та фосфору у складі поверхневих шарів [14] слід використовувати електроліт № 3 складу. Електроліт № 1 можна використовувати для гомогенізації поверхні поршневих силумінів та формування на них оксидних покриттів  $Al_2O_3$ .

Також слід зауважити, що оцінка експлуатаційних характеристик досліджених електролітів ПЕО показує, що стабільність розчинів та термін їх служби зростає в ряду електроліт 3 < електроліт 2 < електроліт 1.

Враховуючи комплекс одержаних результатів для подальших досліджень обрано базовий електроліт № 2 0,4 моль/дм<sup>3</sup>  $K_4P_2O_7$ , 0,1 моль/дм<sup>3</sup>  $CoSO_4$ .

### Вплив режиму формування

Вплив густини струму ПЕО на процес формування гетерооксидних покриттів вивчали для сплавів АК21 та АЛ30, враховуючи суттєву різницю вмісту кремнію у їх складі. Швидкість оксидування сплавів в цілому можна оцінити за кутом нахилу хронограм формування на кожній із характеристичних ділянок. Зокрема швидкість оксидування поверхні сплавів збільшується з ростом густини струму в інтервалі від 5,0 до 10,0 А/дм<sup>2</sup> для АК21 та в інтервалі від 3,0 до 10,0 А/дм<sup>2</sup> для АК30.

Слід зазначити, що для ПЕО АК21 доцільно використовувати вищі  $j$ , що обумовлено його більшим вмістом в складі сплаву. Зі збільшенням  $j = 5,0\text{--}10,0$  А/дм<sup>2</sup> (рис. 6) час виходу на режим іскріння зменшується з 12,5 до 1 хв. Напруга іскріння у всіх випадках становить 120–130 В. Вища інтенсивність іскріння під час ПЕО спостерігається при  $j = 10,0$  А/дм<sup>2</sup>, але світіння розрядів переважно відбувається по межах кристалів Si на поверхні, що на хронограмі напруги візуалізовано значною кількістю осциляцій.

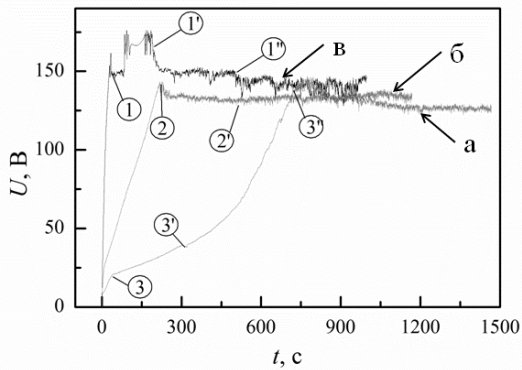


Рисунок 6. Формувальні залежності  $U-t$  плазмо-електролітного оксидування силуміну АК21 у дифосфатному електроліті  $0,4 \text{ M K}_4\text{P}_2\text{O}_7$  та  $0,1 \text{ M CoSO}_4$  за  $j$ , А/дм<sup>2</sup>: 5 (а), 7 (б), 10 (в)

Для АЛ30 робочий інтервал  $j$  є меншим та складає 3,0–7,0 А/дм<sup>2</sup> (рис. 7). Залежність впливу густини струму для цього сплаву є схожою до АК21. Проте

використання стартової  $j$  під час ПЕО більше ніж  $7,0 \text{ A/дм}^2$  недоцільно через миттєвий перехід процесу в режим дугових розрядів, що руйнують утворений оксидний шар, коли ПЕО слід припиняти.

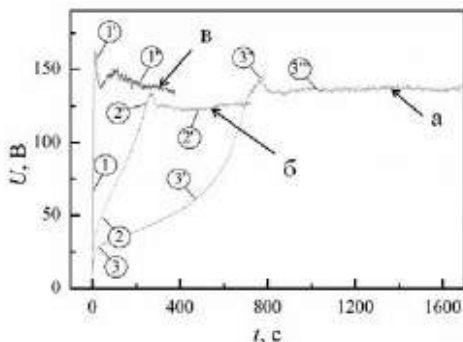


Рисунок 7. Формувальні залежності  $U-t$  плазмо-електролітного оксидування силуміну АЛ30 у дифосфатному електроліті  $0,4 \text{ M K}_4\text{P}_2\text{O}_7$  та  $0,1 \text{ M CoSO}_4$  за  $j$ ,  $\text{A/дм}^2$ : 3 (а), 5 (б), 7 (в)

При зростанні  $j$  в інтервалі  $3,0-7,0 \text{ A/дм}^2$  (рис. 7) час виходу на режим іскріння зменшується від 13 хв до 1,5 хв. Більш висока інтенсивність іскріння по поверхні зразка спостерігається при  $j 5,0 \text{ A/дм}^2$ . При цьому вплив густини струму досить наочно проявляється в зміні морфології та складу синтезованих покриттів (рис. 8, рис. 9), а також відображає кінетичні закономірності їх формування [15].

Встановлено, що оксидування сплавів при густині струму  $5,0 \text{ A/дм}^2$  для АК21 та  $3,0 \text{ A/дм}^2$  для АЛ30 відбувається з невисокою швидкістю. Наявність перегину на формувальних залежностях (рис. 9 та 10, залежність а) свідчить про конкуренцію процесів формування  $\text{Al}_2\text{O}_3$  і розчинення легувальних елементів сплаву (зокрема, кремнію).

У зазначених умовах в цілому створюються передумови для інкорпорації кобальту до складу синтезованого оксидного покриття, однак його середній вміст в поверхневих шарах дуже невисокий і складає 5-7 ат. %. Через низьку швидкість формування на поверхні залишається досить багато кремнію – до 6 ат. % (рис. 11 та 12 а). З цієї ж причини на поверхні АК21 сформоване покриття (рис. 11, а) є нерівномірним та містить лише окремі ділянки, що складаються

з переплавів компонентів електроліту. Покриття на АЛ30 (рис. 12 а) є більш рівномірним, та складається переважно із  $\text{Al}_2\text{O}_3$ .

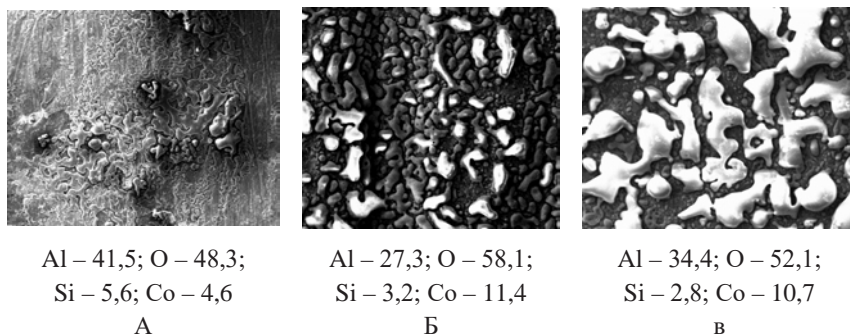


Рисунок 8. Морфологія та склад поверхні (ат.%) покриттів  $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CoO}_x$  на АК21 за густин струму,  $\text{A}/\text{дм}^2$ : 5,0 (а); 7,0 (б); 10,0 (в)

Підвищення густини струму до  $7,0 \text{ A}/\text{дм}^2$  для АК21 та до  $5,0 \text{ A}/\text{дм}^2$  для АЛ30 (рис. 9 та 10, залежність б) сприяє інтенсифікації процесу оксидування і стабілізації світіння розрядів, що сприяє більш швидкому розчиненню кремнію з поверхневих шарів [16]. Чіткий перегин на залежностях в точці 2 позначає перехід процесу від іскріння в область мікродугових розрядів, де відбувається інтенсифікація процесу синтезу гетерооксидного шару.

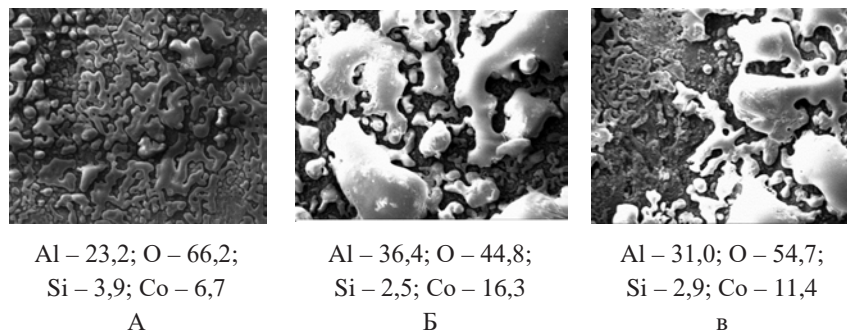


Рисунок 9. Морфологія та склад поверхні (ат.%) покриттів  $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CoO}_x$  на АЛ30 за густин струму,  $\text{A}/\text{дм}^2$ : 3,0 (а); 5,0 (б); 7,0 (в)

За таких умов формування оксидів алюмінію та кобальту з високим питомим опором дозволяє вести процес ПЕО протягом досить тривалого

інтервалу часу і отримувати оксидні шари, збагачені допувальним компонентом. Це підтверджується результатами дослідження морфології та хімічного складу синтезованих покриттів (рис. 11 та 12 б). Окремі кулясті острівці характерного синьо-фіолетового кольору та об'ємні мозаїчні структури покривають оброблювану поверхню та містять до 16 ат. % кобальту, а залишковий вміст кремнію в поверхневих шарах становить не більше 3 ат. %.

ПЕО при початковій густині струму  $10 \text{ А/дм}^2$  для АК21 та  $7,0 \text{ А/дм}^2$  для АЛ30 (рис. 9 та 10, залежність в) призводить до стрімкого зростання напруги до 155-160 В, що пов'язано із формування бар'єрного шару  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Однак слід зауважити, процес оксидування є нестабільним (відрізок 1-1□), напруга формування ПЕО падає до рівня 130-140 В, що вочевидь пов'язано із екрануванням кристалами кремнію оброблюваної поверхні. Для АК21 з 5 хв. ПЕО процес стабілізується, відбувається перехід в мікродуговий режим, який можна проводити протягом тривалого часу. Для АЛ30 навпаки, спостерігається майже миттєвий перехід в режим дугових розрядів, на поверхні зразка візуалізуються великі дугові розряди, що руйнують сформований оксидний шар. В цьому випадку не вдається отримати покриття достатньої якості. Морфологія поверхневих шарів характеризується наявністю укрупнених острівцевих структур, збагачених кобальтом, для АК21 (рис. 11 в) та ділянок зі зруйнованим покриттям для АЛ30 (рис. 12, в). У той же час середній по поверхні вміст кобальту становить не більше 11,0 ат. % (рис. 14, в). Вміст кремнію у синтезованих покриттях коливається в межах 3,0 ат. %.

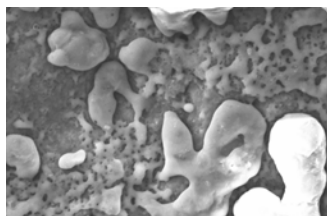
Одержані результати щодо аналізу кінетичних закономірностей синтезу покриттів з урахуванням морфології та складу їх поверхневих шарів, дозволяють рекомендувати наступні значення стартових (початкових) густин струму для ПЕО модельних зразків поршневих силумінів:  $5,0 \text{ А/дм}^2$  для АЛ30 та  $7,0 \text{ А/дм}^2$  для АК21, що використовувались у подальших дослідженнях.

Роботи інших дослідників [17] та попередні напрацювання [18] підтвердили доцільність проведення процесу ПЕО багатокomпонентних сплавів алюмінію в режимі «спадаючої потужності». Враховуючи аналіз формувальних

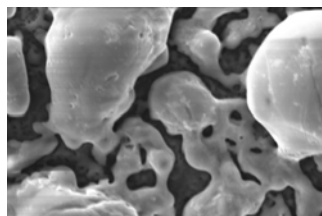
залежностей (рис. 6, рис. 7) на другому етапі ПЕО (після виходу на режим іскріння) густину струму знижували з 10,0 до 7,0 А/дм<sup>2</sup> для АК21 та з 5,0 до 3,0 А/дм<sup>2</sup> для АЛ30. При цьому слід зазначити, що кінцева напруга формування покриттів залежить від початкової густини струму ПЕО. Оптимальним значенням є  $U$  на рівні 140-160 В, що дозволяє вести процес ПЕО протягом значного періоду часу.

Таким чином встановлено, що густина струму для першої стадії ПЕО поршневих силумінів в кобальто-дифосфатних електролітах знаходиться в інтервалі 5,0 – 10,0 А/дм<sup>2</sup>, в той час як другий етап оксидування доцільно проводити при густині струму 3,0–7,0 А/дм<sup>2</sup>.

Використання запропонованого режиму «спадаючої потужності» прогнозовано дозволяє покращити якісні та кількісні характеристики синтезованого покриття, зокрема отримати більш рівномірні покриття із вмістом кобальту до 14,0 ат. % для покриття на АК21 та до 20,0 ат. % для покриття на АЛ30 (рис. 10).



а) Al – 21,4; O – 61,2;  
Si – 3,8; Co – 13,6



б) Al – 27,9; O – 49,9;  
Si – 2,5; Co – 19,7

*Рисунок 10. Морфологія поверхні та склад (ат. %) ПЕО-покриттів на сплавах АК21 (а) та АЛ30 (б) сформованих в режимі «спадаючої потужності». Збільшення  $\times 2000$*

#### **Вплив тривалості плазмо-електролітного оксидування**

Встановлені раціональний склад електроліту та інтервал густин струму для синтезу покриття були використані для оптимізації тривалості ПЕО з метою одержання оксидних шарів, збагачених каталітичним компонентом.

Параметрами контролю для визначення раціонального часового інтервалу ПЕО виступали зміна хімічного складу синтезованих покриттів (рис. 11).

Аналіз зміни хімічного складу отриманих оксидних структур на АК21 (рис. 11 а) свідчить про збагачення поверхневого шару кобальтом зі збільшенням часу ПЕО. Найменший вміст кобальту в покритті (до 1,0 ат. %) отримано при оксидуванні зразків протягом 10 хвил. Після цього спостерігається поступове зростання його вмісту до 20,0 ат. % при збільшенні часу оксидування до 40 хвил. (максимум залежності  $\omega(\text{Co})-t$ ). Після досягнення максимуму при продовженні оксидування до 60 хвил., вміст каталітичного компоненту у складі покриттів поступово зменшується майже вдвічі (до 10,0 ат. %).

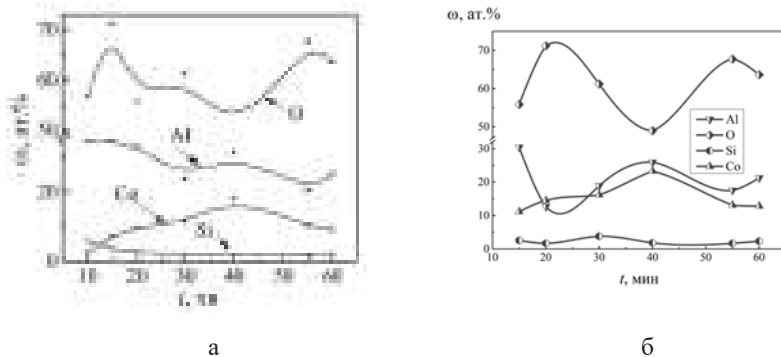


Рисунок 11. Зміна хімічного складу гетерооксидних покриттів  $\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{CoO}_x$  від часу ПЕО поришневих силумінів АК21 (а) та АЛ30 (б)

Для вмісту кремнію в поверхневих шарах спостерігається зворотна залежність: зі збільшенням часу ПЕО його концентрація зменшується. Найбільш ефективно видалення Si (до 2,5-3,0 ат. %) з поверхневого шару досягається при ПЕО більше 25 хвил. (рис. 16, а), що пояснюється хімічною нестійкістю оксидів кремнію в лужному середовищі [19]. Вміст алюмінію та кисню в синтезованому покритті відображає формування оксидної матриці основного металу (алюмінію) та оксидів допувального компоненту.

Аналогічна закономірність встановлена для ПЕО сплаву АЛ30 (рис. 11 б). Поступове вміст кобальту зростає до 23,0 ат. % при збільшенні часу оксидування

в досліджуваному інтервалі часу з максимумом на 40 хвил. ПЕО. Залежність для змінення вмісту кремнію тотожна для розглянутої вище для покриттів на АК21. Його вміст після 25 хвил. ПЕО не перевищує 2,0 ат. %.

Таким чином, для формування гетерооксидних шарів, збагачених кобальтом, при одночасному зменшенні (мінімізації) вмісту кремнію ПЕО силумінів доцільно проводити протягом 20–40 хвил.

### ***Топографія поверхневих шарів гетерооксидних кобальтовмісних покриттів на поришевих силумінах***

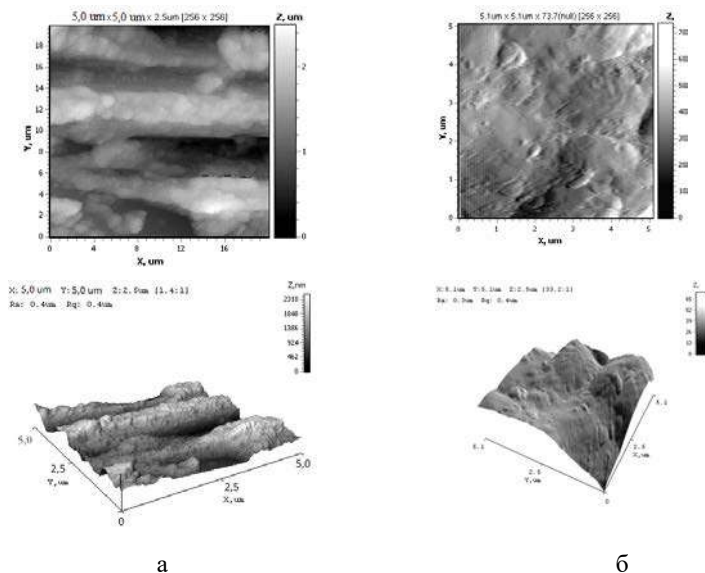
Виходячи із аналізу морфології поверхні синтезованих кобальтовмісних покриттів одержані гетерооксидні системи будуть мати високий ступінь розвинення поверхні [20]. Це підтверджується результатами досліджень топографії поверхневих шарів методом атомно-силової мікроскопії.

Область для дослідження була обрана на поверхні електродів із досліджених сплавів (АЛ30, АК21), на яких методом ПЕО синтезоване покриття. Враховуючи особливості контактного методу дослідження топографії поверхневих шарів з використанням атомно-силового мікроскопу НТ-206 [21], зокрема розподільну здатність зонду для сканування, а також сфероїдно-мозаїчну морфологію поверхні синтезованого покриття, цілком очевидним є те, що досліджено найбільш виступаючі зовнішні ділянки оксидного шару, які на СЕМ-зображеннях під час опису морфології поверхні позначались як виступ покриття. На всіх структурах відмічена тотожність характеристик поверхні на різних ділянках, що дозволило екстраполювати дані на характеристики досліджуваного зразка в цілому. Провести повний цикл сканування поверхні вдалося тільки на малій площі дослідження (5 мкм, рис. 12), що фактично свідчить про дослідження нанорельєфу синтезованого покриття.

Аналіз топографії поверхні синтезованих кобальтовмісних структур свідчить, що вони утворені агломератами сфероподібних зерен, розмір яких коливається в межах декількох сот нанометрів. В цілому, сформований гетерооксидний шар є мікроглобулярним, але в той же час досить нерівномірним за осями  $x$ ,  $y$  та  $z$ , що узгоджується із аналізом морфології поверхневих шарів,

розглянутим вище. Також можна виявити певні відмінності топографії синтезованого оксидного шару залежно від типу сплаву, який піддавався ПЕО.

Поверхневий шар ПЕО-покриття на сплаві АЛ30 (рис. 12 а) утворено структурами меншого розміру, але більш чисельними, порівняно з покриттям на АК21, покриття на якому має більш згладжену поверхню (рис. 12 б).



*Рисунок 12. 2D- та 3D-карти поверхні кобальтовмісного покриття на сплавах АЛ30 (а) та АК21 (б), сформованих протягом 15 хвил. Площа сканування 5×5 мкм.*

За оцінкою кількісних показників середньоарифметичної ( $R_a$ ) та середньоквадратичної ( $R_q$ ) шорсткості відповідно до ISO 4287/1 встановлено, що вони знаходяться в діапазоні 0,3-0,4 мкм для покриттів на обох сплавах.

Враховуючи можливості АСМ-аналізу також можна визначити фрактальну розмірність ( $D_F$ ) синтезованих покриттів (рис. 13), яка є ступенем відображення структурної організації синтезованих гетерооксидних покриттів.

Визначено, що  $D_F$  для покриття на сплаві АЛ30 становить 2,87, а для оксидної системи на АК21 зменшується до 2,45. Це можна пояснити, передусім

більшим вмістом кобальту у покритті для першого сплаву, а відтак і вищим ступенем розвинення поверхневого шару. Таким чином можна зробити висновок, що  $D_F$  зростає при збільшенні вмісту допantu (кобальту) у поверхневому шарі та зменшенні вмісту кремнію, як основного легувального елемента силуміну.

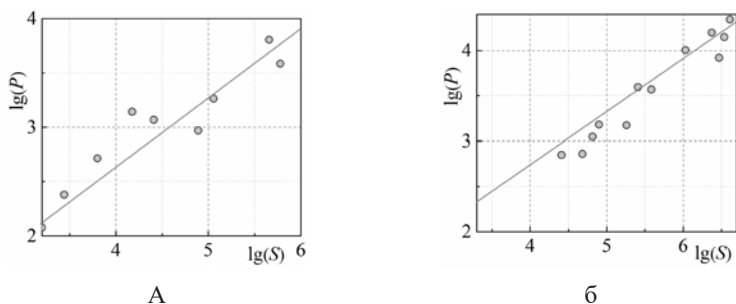


Рисунок 13. Графічний фрактальний аналіз покриттів, сформованих протягом 15 хв. на поршневих сплавах алюмінію: а – АЛ30, б – АК21.

#### **Фазовий склад синтезованих покриттів $Al_2O_3 \cdot CoO_x$**

Результати аналізу морфології поверхні та хімічного складу синтезованих покриттів на поршневих силумінах свідчать про утворення змішаного гетерооксидного шару під час ПЕО, який, ймовірно, складається із оксидної матриці основного металу ( $Al_2O_3$ ), в яку включені оксиди основного легувального елемента (кремнію) та компонентів електроліту, зокрема кобальту. Дослідження фазового складу синтезованих гетерооксидних покриттів підтверджують дане припущення.

Встановлено (рис. 14), що синтезоване гетерооксидне покриття на сплаві АК21 складається із матриці  $\alpha-Al_2O_3$  (корунду) з інкорпорованими оксидами кобальту  $Co_3O_4$  змінного ступеню окиснення ( $CoO \cdot Co_2O_3$ ) та кремнієм в складі оксидованої поверхні. При цьому на дифрактограмі виявлено аморфне гало на кутах  $2\theta \sim 20^\circ$ , що зумовлено особливостями формування оксидної структури у нерівноважних умовах під дією іскрових та мікродугових розрядів [22]. Слід

зазначити, що для інших поршневих силумінів (АЛ30, АЛ25) фазовий склад в цілому не відрізняється, відмінним є лише інтенсивність виявлених піків [23].

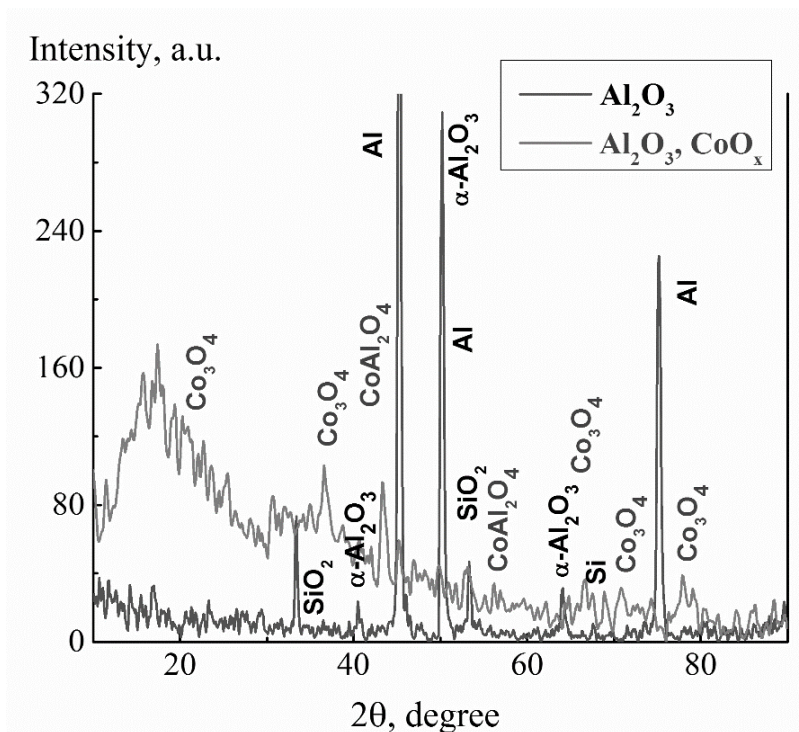


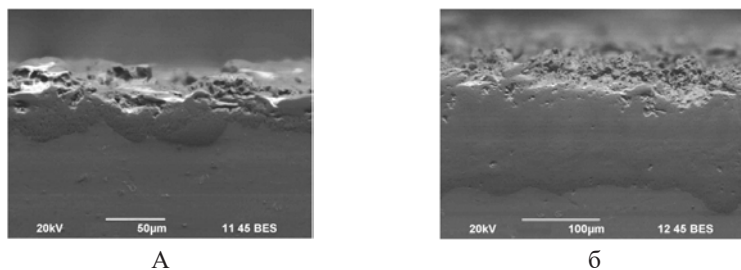
Рисунок 14. Дифрактограма гетерооксидного покриття  $Al_2O_3 \cdot CoO_x$ , синтезованого на сплаві АК21 в кобальто-дифосфатному електроліті в режимі «спадаючої напруги»

Таким чином можна зробити висновок про достатню термічну стійкість синтезованого гетерооксидного покриття, що в той же час має виявляти й підвищені функціональні властивості, зокрема механічні й каталітичні.

### Властивості синтезованих нанокompозитних покриттів

Відомо, що адгезія електрохімічних покриттів до основного металу (підкладки) є одним з головних експлуатаційних чинників, що визначають можливість їх практичного застосування.

Результати металографічних досліджень синтезованих матеріалів довели, що сформовані гетерооксидні покриття, мають високу адгезію до металу-носія (поршневих сплавів алюмінію) та зберігають її при механічній обробці. При поліруванні, шліфуванні та інших видах механічної обробки зразків оксидованих сплавів не виявлено відшарування, зламів та відколів покриття від поверхні носія. Як видно з рис. 15, на підготовлених металографічних шліфах зразків зі сформованими гетерооксидним покриттями відсутні ознаки відшарування, що є свідченням міцного зчеплення з металом-носієм.



*Рисунок 15. СЕМ-зображення поперекового перерізу сформованих оксидних покриттів на поршневих сплавах алюмінію: АК21 (а) та АЛ30(б)*

Відповідно до отриманих даних товщина синтезованого покриття варіюється від 20 до 100 мкм залежно від сплаву, на якому воно сформовано, режиму та часу ПЕО.

За результатами досліджень визначено, що за умов дотримання рекомендованого режиму ПЕО за однаковий час на сплаві АЛ30 формується покриття більшої товщини у 1,5-2,0 рази, ніж на АК21, що обумовлено вищим вмістом кремнію в останньому.

Встановлено, що під дією високих температур адгезія з основним металом досліджуваних покриттів не змінюється, що свідчить про достатню стабільність одержаної гетерооксидної системи, її високу каталітичну активність та прогнозовану ефективну працездатність за високих температур, що є сприятливим для синтезованого каталітичного матеріалу [24].

Це обумовлено особливостями процесу плазмо-електролітного оксидування, а саме виникненням значного локального градієнту температур

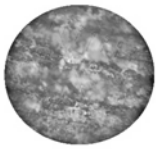
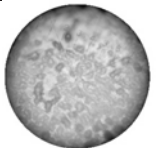
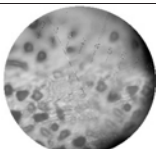
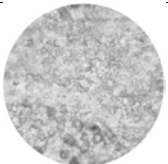

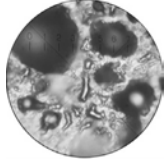
у зонах пробою оксидного шару [25], коли в утвореній оксидній системі фактично немає межі розподілу між поверхнею сплаву та сформованим покриттям. Саме це дозволяє розглядати зазначені матеріали, як покриття для деталей поршневої групи ДВЗ, що працюють в умовах високих температур, тиску та тертя.

#### ***Мікротвердість та зносостійкість синтезованих покриттів $Al_2O_3-CoO_x$***

Змінення фазової структури поверхневих шарів під час ПЕО та формування оксидної матриці  $\alpha-Al_2O_3$  з інкорпорованими оксидами кобальту та кремнію, прогнозовано обумовлюють підвищення мікротвердості та зносостійкості одержаного гетерооксидного покриття. У той же час, коректне визначення цих показників ускладнюється високим ступенем розвинення поверхневого шару та необхідністю попереднього шліфування одержаних покриттів.

Узагальнені дані щодо визначення показників мікротвердості та зносостійкості покриттів із різним вмістом допувального компонента в їх складі наведено у табл. 5. Встановлено, що показники мікротвердості для обох досліджених сплавів зростають зі збільшенням  $\square(Co)$  у складі покриття. Причому збільшення вмісту кобальту в 1,8-2,1 рази в покритті на АК21 зумовлює зростання мікротвердості в 1,3-1,5 разів. Для покриття на АЛ30 мікротвердість збільшується в 1,2-1,3 рази при зростанні вмісту кобальту в 1,3-1,4 рази. Це можна пояснити утворенням більшої кількості фаз шпінелі  $CoAl_2O_4$  в складі покриттів [26] та вищим  $\square(Si)$  в покриттях на АК21. Іншою важливою технологічною характеристикою міцності є здатність синтезованих гетерооксидних покриттів протистояти абразивному зношуванню, що в цілому є показником їх зносостійкості. Прогнозовано вона буде залежати від характеристики оброблюваного матеріалу, складу, товщини та властивостей сформованого покриття [27]. За результатами тестування показано, що збільшення вмісту  $\square(Co)$  в поверхневих шарах обумовлює зниження показників зношування в 1,7-2,8 разів. Для покриттів, сформованих на АК21 встановлено вищу зносостійкість, ніж на АЛ30, навіть при меншому  $\square(Co)$ , що, ймовірно обумовлено топографією поверхневих шарів. Враховуючи більшу кількість великих сфероїдних кобальтовмісних структур в покритті на АЛ30, саме вони першочергово піддаються зношуванню.

Таблиця 5. Показники мікротвердості та швидкості абразивного зношування ( $\Delta l/\Delta t$ ) гетерооксидних покриттів на поришевих силумінах залежно від складу покриття

Сплав	Зовнішній вигляд покриття. Збільшення $\times 50$	$j$ А/дм <sup>2</sup> *	$t$ , хв	$\square(\text{Co})$ , ат.%	$H_v$ , кг/мм <sup>2</sup>	$\Delta l/\Delta t$ , мкм/год
АК21		10	5	4,5	114,5	0,27
		10/7	30	9,6	142,8	0,14
		10/7	45	17,0	209,2	0,05
АЛ30		5	5	10,7	106,5	0,29
		5/3	30	14,5	136,5	0,17
		5/3	45	20,5	162,9	0,08

Примітка: \* режим «спадаючої потужності».

Виявлені закономірності корелюють із кінетичними особливостями плазмо-електролітної обробки сплавів алюмінію, викладеними у попередніх розділах, та співпадають із результатами для покриттів, сформованих на сплавах іншого хімічного складу [28,29]. У цілому ПЕО поршневих силумінів дозволяє одержувати гетерооксидні покриття, які в 1,5 – 2,0 рази перевершують механічні показники необробленої поверхні.

Наведені результати відбивають природну залежність трибологічних властивостей покриття від складу оброблюваного металу [30]. При цьому також необхідно враховувати й товщину сформованого оксидного шару, яка, в свою чергу, симбатно залежить від кінцевої напруги формування та сприяє підвищенню стійкості до стирання.

## **ПОДЯКИ**

Дослідження було проведено за підтримки Міністерства освіти і науки України в рамках проекту (ДР № 0119U002568).

## **ВИСНОВКИ**

Встановлено особливості ПЕО силумінів із  $\square$ (Si) 11,0-21,0 мас. % у дифосфатних електролітах з додаванням сполук кобальту(II). Визначено параметри керування процесом формування рівномірних гетерооксидних покриттів  $Al_2O_3 \cdot CoO_x$  товщиною до 100 мкм із  $\square$ (Co) до 23,0 мас. %.

Показано, що включення кобальту відбувається у вигляді оксиду  $Co_3O_4$  ( $CoO \cdot Co_2O_3$ ), який кристалізується у ґратці шпінелі, що поряд із високим ступенем розвинення поверхні є передумовою підвищення функціональних властивостей синтезованих гетерооксидних шарів, зокрема мікротвердості та зносостійкості.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Rudnev V.S., Lukiyanchuk I.V., Vasilyeva M.S., Medkov M.A., Adigamova M.V., Sergienko V.I. Aluminum- and titanium-supported plasma electrolytic multicomponent coatings with magnetic, catalytic, biocide or biocompatible properties // *Surface & Coatings Technology*, 2016. Vol. 307, Part C. P. 1219–1235. DOI:10.1016/j.surfcoat.2016.07.060
2. Gupta P., Tenhundfeld E. O., Daigle D., Ryabkov G. Electrolytic plasma technology: Science and engineering – An overview // *Surface and Coatings Technology*, 2007. Vol. 201, Issue 21. P. 8746–8760. DOI:10.1016/j.surfcoat.2006.11.023.
3. Sakhnenko M., Karakurkchi A., Galak A., Menshov S., Matykin O. Examining the formation and properties of TiO<sub>2</sub> oxide coatings with metals of iron triad // *Eastern European Journal of Enterprise Technologies*, 2017. Vol. 2, No. 11 (86). P. 4–10.
4. Sakhnenko M., Ved M., Karakurkchi A. Morphology and Properties of Coatings Obtained by Plasma-Electrolytic Oxidation of Titanium Alloys in Pyrophosphate Electrolytes // *Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces*, 2017. Vol. 53. No 6, P. 1082–1090.
5. Sakhnenko N. D., Ved' M. V., Luhovskyi I. S., Drobakha H. A., Mayba M. V. Features of plasma electrolytic formation of manganese- And cobalt-containing composites on aluminum alloys // *Advances in Materials Science and Engineering*, 2019. Vol. 2019. Article ID 6381291. 13 p. DOI: 10.1155/2019/6381291.
6. Terleeva O. P., Belevantsev V. I., Slonova A. I., Boguta D. L., Rudnev V. S. Comparison analysis of formation and some characteristics of microplasma coatings on aluminum and titanium alloys // *Protection of Metals*. 2006. Vol. 42, No. 3, P. 272–278. DOI: 10.1134/S0033173206030106.
7. Karakurkchi A., Sakhnenko M., Ved' M., Gorohivskiy A., Galak O., Menshov S., Matykin O. Cobalt and manganese oxide catalytic systems on valve metals in ecotechnologies. Promising Materials and Processes in Applied

Electrochemistry: monograph / editor-in-chief V. S. Barsukov. Kyiv, 2017. P. 214–223.

8. Walsh F. C., Low C. T. J., Wood R. J. K., Stevens K. T., Archer J., Poeton A. R. Plasma electrolytic oxidizing (PEO) for production of anodised coatings on lightweight metal (Al, Mg, Ti) alloys // *Transactions of the Institute of Metal Finishing*, 2009. Vol. 87, No. 3. P. 122–135. DOI:10.1179/174591908X372482.

9. Parsadanov I. V., Sakhnenko M. D., Khyzhnyak V. O., Karakurkchi H. V. Improving the environmental performance of engines by intra-cylinder neutralization of toxic exhaust gases // *Internal Combustion Engines*, 2016. No. 2, 63–67. DOI:10.20998/0419-8719.2016.2.12.

10. Yerokhin A. L., Nie X., Leyland A., Matthews A., Doney S. J. Plasma electrolysis for surface engineering // *Surface and Coating Technology*, 1999. Vol. 122, No. 2–3. P. 73–93. DOI: 10.1016/s0257-8972(99)00441-7.

11. Ved M. V., Karakurkchi A. V., Sakhnenko N. D., Gorohivskiy A. S. Synthesis of catalytic cobalt-containing coatings on alloy AL25 surface by plasma electrolytic oxidation // *Chemistry, Physics and Technology of Surface*, 2017. Vol. 8, № 1. P. 73-79. DOI: 10.15407/hftp08.01.073.

12. Slonova A. I., Terleeva O. P. Morphology, structure, and phase composition of microplasma coatings formed on Al-Cu-Mg alloy // *Protection of Metals*, 2008. No. 44. P. 65–75.

13. Крылов О. В. Гетерогенный катализ. Москва : Академкнига, 2004. 679 с.

14. Каракуркчі Г. В., Сахненко М. Д., Ведь М. В., Горохівський А. С., Щокін В. М. Підходи щодо підвищення паливної економічності двигунів внутрішнього згорання бронетанкового озброєння та автомобільної техніки // *Системи озброєння і військова техніка*, 2016. № 2(46). С. 26–31.

15. Плазменно-электролитическое модифицирование поверхности металлов и сплавов : в 2 т. / под общ. ред. И. В. Суминова. Москва : Техносфера, 2011. Т. 2. 512 с.

16. Каракуркчі Г. В., Сахненко М. Д., Ведь М. В., Горохівський А. С., Галак О. В. Особливості одержання металоксидних каталітичних систем плазмово-електролітичним оксидуванням алюмінію та титану в пірофосфатних електроліт / *Вісник НТУ «ХПИ». Серія: Хімія, хімічні технології та екологія*. 2016. № 22(1194). С. 171–176.

17. Токарева И. А., Байрачный Б. И. Наноструктурированные анодные оксидные покрытия на вентиляльных металлах – задачи и возможности. Наносистемы, наноматеріали, нанотехнології: Збірник наукових праць. 2017. Т. 15, № 4. С. 713–740.

18. Yar-Mukhamedova G., Ved M., Karakurkchi A., Sakhnenko N., Atchibayev R. Research on the improvement of mixed titania and Co (Mn) oxide nanocomposite coatings. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018. Vol. 369. 012019. DOI: 10.1088/1757-899X/369/1/012019.

19. Ведь М. В., Сахненко М. Д., Богоявленська О. В. Моделирование поверхности обработки пассивных металлов // *Фізико-хімічна механіка матеріалів*, 2008. № 1. С. 69–75.

20. Сахненко М. Д., Ведь М. В., Каракуркчі Г. В., Майба М.В. Инверсия структурных матриц металоксидных композитов. Перспективні матеріали та процеси в прикладній електрохімії: монографія / за заг. ред. В. З. Барсукова. Київ : КНУТД, 2018. С. 229–236.

21. Миронов В. Л. Основы сканирующей зондовой микроскопии, Нижний Новгород, 2004. 110 с.

22. Hussein R.O., Nie X., Northwood D.O. Influence of process parameters on electrolytic plasma discharging behaviour and aluminum oxide coating microstructure // *Surface and Coatings Technology*, 2010. Vol. 205. P. 1659–1667. doi:10.1016/j.surfcoat.2010.08.059.

23. Gebarowski W., Pietrzyk S. Growth characteristics of the oxide layer on aluminium in the process of plasma electrolytic oxidation // *Archives of Metallurgy and Materials*, 2014. Vol. 59.P. 407–411.

24. Vasilyeva M. S., Rudnev V. S. Composition, Surface Structure and Catalytic Properties of Manganese- and Cobalt-Containing Oxide Layers on Titanium // *Advanced Materials Research*, 2014. Vol. 875–877, P. 351–355. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.875-877.351.
25. Клапків М. Д., Імбірочич Н. Ю., Посувайло В. М., Остап'юк С. І. Плазмоелектролітне окисдування легких сплавів і напилених шарів // *Наукові нотатки*, 2011. Вип. 31. С. 151–155.
26. Cui Sh., Han J., Li W., Kang S.-B., Lee J.-M. Study on wear behavior of plasma electrolytic oxidation coatings on aluminum alloy // *Rare Metals*, 2006. Vol. 25, Is. 6, Suppl. 2. P. 141–145.
27. Karakurkchi A., Sakhnenko N., Ved M., Parsadanov I., Menshov S. Nanostructured oxide-metal catalysts for intra-cylinder catalysis. Proceedings of the 2018 IEEE 8th International Conference on Nanomaterials: Applications and Properties. 2019. DOI:10.1109/NAP.2018.8914840.
28. Egorkin V. S., Vyalyi I. E., Sinebryukhov S. L., Gnedenkov S. V. Composition, morphology and tribological properties of PEO-coatings formed on an aluminum alloy D16 at different duty cycles of the polarizing signal // *Non-Ferrous Metals*, 2017. Vol. 42, No 1. P. 12–16.
29. Ma C., Lu Y., Sun P., Yuan Y., Jing X., Zhang M. Characterization of plasma electrolytic oxidation coatings formed on Mg–Li alloy in an alkaline polyphosphate electrolyte // *Surface and Coatings Technology*, 2011. Vol. 206, No 2-3. P. 287–294. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2011.07.019.
30. Kim J.-Y., Barnat E., Rymaszewski E. J., Lu T.-M. Frequency-dependent pulsed direct current magnetron sputtering of titanium oxide films // *Journal of Vacuum Science & Technology. A*. 2001. Vol. 19, No 2. P. 429 – 434.

# ШЛЯХИ ВИРІШЕННЯ ДЕЯКИХ ЕКОЛОГІЧНИХ ПРОБЛЕМ, ВИКЛИКАНИХ ДІЯЛЬНІСТЮ ЛЮДИНИ У ВІЙСЬКОВІЙ СФЕРІ

*Карножицький П. В., Мірошниченко Д. В., Руднева К. Є.,  
Руднев В. А., Сініцина А. О.*

## Вступ

Серйозні екологічні проблеми виникли в результаті інтенсивного забруднення гідросфери Землі різними сполуками важких металів. Останні, особливо, водорозчинні, високотоксичні, внаслідок чого їх накопичення в навколишньому середовищі вкрай негативно позначаються на здоров'ї людей. Воєнна галузь, нажаль, це одна з напрямів людської діяльності, в результаті якої генерується значна кількість радіоактивних та інших відходів, наявність яких призведе до забруднення водних джерел та ґрунтів.

У зв'язку з цим, одним із важливих завдань, що стоять перед людством, є забезпечення ефективного очищення технологічних вод, що скидаються в природні джерела, а також очищення вже забруднених природних вод.

Для вирішення цих завдань одним з ефективних засобів можуть розглядатися барометричні методи, зокрема, ультрафільтрація [1]. Підвищення ефективності дії ультрафільтраційних мембран здійснюється за допомогою спеціальних реагентів, здатних зв'язувати іони важких металів в комплекси, що значно обмежує рухливість іонів і дозволяє концентрувати останні, на поверхні мембрани. Такий метод, що носить назву комплексоутворювач-ультрафільтрація (КУУФ) є одним з найбільш ефективних методів, що дозволяє очищати воду від слідів металів і знижувати їх концентрацію до норм ГДК.

Застосування баромембранних методів очищення робить можливим створення ефективних та маловідходних технологій очищення води від радіонуклідів і токсичних органічних речовин, а також рекультивациі територій, забруднених радіоактивними відходами.

Ефективність методу КУУФ полягає в тому, що розміри молекул комплексоутворювачів можна порівняти з розмірами пір ультрафільтраційних

мембран та, в більшості випадків, перевершують їх. Це дозволяє, після зв'язування іонів важких металів в міцні комплекси, отримувати глибоко очищену воду в фільтраті і концентрувати метали до величин, що дозволяють виділяти їх звичайними, економічно доцільними методами.

В якості комплексуєтворювачів, використовують в даний час для реалізації методу КУУФ, як правило, синтетичні водорозчинні продукти, такі як поліетиленімін, декстран, полідіалілдиметіламонній хлорид [2, 3], тіосемікарбазид [4] та інші полімери, які мають високу молекулярну масу і здатність зв'язуватися з іонами металів.

Загальним недоліком синтетичних комплексуєтворювачів є їх перехід в фільтрат при очищенні і попадання в природні водні джерела, крім того, такі речовини відносно дорогі.

Таких недоліків позбавлені комплексуєтворювачі отримані з природної сировини. Наприклад, хітозан, продукт переробки хітину [5], ефективний комплексоутворювач, екологічно безпечний, легко руйнівний в природних умовах.

Для України, з точки зору доступності і дешевизни, в якості комплексуєтворювача для методу КУУФ можна розглядати гумінові кислоти (рис. 1), одержані з бурого вугілля, запаси якого дуже великі.

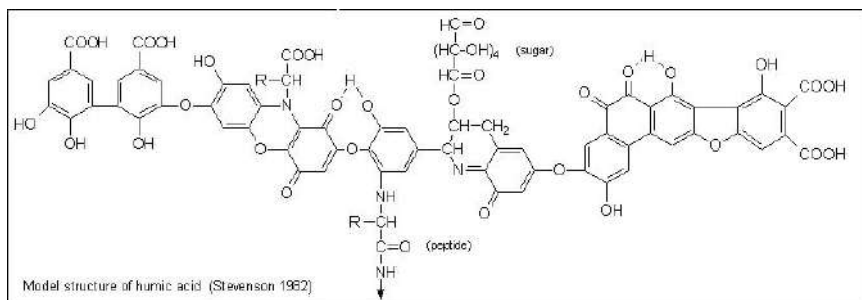


Рисунок 1. Структурна формула гумінових кислот

Гумінові кислоти є основним компонентом органічної маси бурого вугілля і відрізняються високим вмістом кисневмісних функціональних груп, таких як

карбоксильні, гідроксильні і хіноїдні. Крім того, гумати містять азотовмісні гетероцикли, які також можуть селективно зв'язуватися з іонами металів утворюючи міцні комплекси.

На думку авторів [6] сорбційні властивості гумінових кислот обумовлені наявністю іонообмінних карбоксильних груп і фенольних гідроксидів. Присутність в структурі гумінових кислот  $=C=O$ ,  $-COOH$ –OH,  $Ar-OH$ ,  $=N-H$ ,  $=N-$  груп сприяє утворенню комплексних сполук в процесі сорбції.

Крім комплексоутворення при взаємодії металів з гуміновими кислотами має місце фізична сорбція і іонообмін [7].

Одним з головних недоліків процесу КУУФ є його низька продуктивність по пермеату (фільтрату) і можливість закупорки пор мембрани молекулами комплексоутворювача. Тому розмір і молекулярна маса гуматів можуть мати значний вплив на ефективність роботи мембран. У даний час серед досліджень немає єдиної думки з приводу цих характеристик гумінових речовин. У попередніх роботах гумінові речовини представлені як набір молекул однієї структури, але значно різняться за молекулярною масою від 1500 до 50000 [8, 9].

В останніх роботах [10, 11] висувається гіпотеза супромолекулярної будови гумінових речовин, які представлені як асоціати щодо малих молекул з молекулярною масою. На думку різних авторів [11, 12] молекули гумінових речовин або їх асоціати мають витягнуту або сферичну форму з розмірами від 3 до 10 нм.

Тому в разі використання ультрафільтраційних мембран з розмірами пор 10–20 нм, які зазвичай, використовують в процесі КУУФ, може спостерігатися забивання останніх молекулами гумінових речовин, що буде супроводжуватися зниженням продуктивності.

Гумінові кислоти (ГК) є аніонними поліелектролітами та відносяться до природніх поглиначів численних забруднювачів – металів та неметалів [13-16].

Сорбенти на основі ГК можуть застосовуватися для зв'язування не тільки катіонів, але також аніонів та органічних забруднювачів, наприклад, пестицидів [17]. Наявність гальванічних, металургічних та інших виробництв, а також

супутнє їм накопичення важких металів в оточуючому середовищі сприяє застосуванню нових методів при очистці від залишкових або накоплених іонів, у тому числі з використанням гуматів [18]. Гуминові кислоти – природні поглиначі важких металів в областях промислових розробок. Їх реальна ефективність залежить від природного вмісту та зменшується при його зниженні [19].

Природне поглинання забруднювачів ГК не є остаточним – гумати здатні в деяких випадках звільнювати токсичні іони металів під впливом великих концентрацій інших елементів, таких як  $\text{Ca}^{2+}$  [20]. Крім того, ГК можуть бути природним «транспортном» для металів в оточуючому середовищі [21], сприяючи їх міграції на значну відстань. Наявність гуматів ускладнює очистку природнього середовища, яка проводиться з використанням хелатних комплексів, таких як ЕДТА [22].

Взаємодія іонів металів з гуматами не має єдиного чіткого механізму. Цьому сприяють складність та різноманітність структури ГК, а також різні умови протікання реакцій в лабораторних та природних умовах [15, 23, 24]. Була відмічена здатність гуматів зв'язувати метали в більш здатному до обміну іонів металів на іони  $\text{H}^+$  стані (менш міцні комплекси) і практично не здатному до обміну стані [25]. Дослідження структури ГК та гуматів металів, міді тощо, методом ІЧ-спектрометрії показало активне залучення карбоксильних груп до утворення зв'язків гумат-метал ( $\text{Г-Me}$ ) [18, 26]. Так, в зазначених роботах акцентується увага на зниженні інтенсивності (до зникнення) смуги поглинання близько  $1720\text{ см}^{-1}$ , специфічної для карбоксильних груп  $-\text{COOH}$  при поглинанні металів та збільшенні інтенсивності смуги при  $1640\text{ см}^{-1}$ , специфічної для групи  $-\text{COO}^-$ . В роботі [27] акцентовано увагу на взаємодії  $\text{Hg}^{2+}$  з групами  $-\text{COOH}$ ,  $-\text{OH}$ ,  $-\text{COONa}$ ,  $-\text{ONa}$  при взаємодії з гуматами натрію.

Підвищення ефективності сорбції при збільшенні концентрації ГК пов'язують зі збільшенням концентрації функціональних груп, що приймають участь в утворенні зав'язків з іонами металів [28]. В цій самій роботі пояснено збільшення ефективності сорбції при високих значеннях рН – при переході від

кислого до лужного середовища відбувається депротонування функціональних груп, що відповідають за утворення зв'язків з металами.

Дослідження структури та властивостей гуматів здійснюється різними методами, у тому числі молекулярної (зокрема ІЧ) та атомної спектроскопії. Слід зазначити, що єдиного погляду стосовно ефективності ІЧ-спектрометрії для дослідження гуматів немає. У роботі [29] показано скептичне відношення щодо застосування методу ІЧ-спектрометрії при дослідженні гумінових речовин через складність розшифровки спектрів, хоча відмічено, що в деяких випадках такі спектри можуть мати цінність. Вже в більш пізній роботі [30] з використанням ІЧ-спектрометрії в середній області приведено пояснення механізму взаємодії та зміни структури гуматів при поглинанні іонів  $Pb^{2+}$ . В роботі [31] показана динаміка змін в ІЧ-спектрах при взаємодії гуматів та іонів  $Fe^{3+}$ , а в дослідженні [32] відмічено, що ІЧ-спектри мають цінну інформацію стосовно функціональних властивостей ГК. У статті [33] приведена збірна детальна інформація відносно ІЧ-спектрів органічної складової ґрунту, в тому числі ГК, а в роботі [34] міститься приклад розшифровки ІЧ-спектрів гумінових кислот, одержаних з навозу.

Вимірювання концентрацій металів при лабораторному та натурному вивченні їх сорбції гуміновими кислотами проводиться різними методами – із застосуванням іонселективного електроду, методами гасіння флуоресценції, анодної вольтамперометрії [35]. При дослідженні комплексів Г-Ме показав ефективність метод маспектрометрії з індуктивно-зв'язаною плазмою (ICP-MS) [36].

Відомо, що комплекси Г-Ме мають низьку стабільність та відносно слабку зв'язувальну активність (ЗА) при низькому рН. Так, для комплексів з цинком вкрай низька ЗА гуматів спостерігається при  $pH=1,5\dots2,5$ . З підвищенням рН на 1 спостерігалось збільшення ЗА приблизно на порядок [37]. Таким чином, збільшення рН підвищує сорбційну здатність гумінових кислот та знижає коефіцієнт обміну  $H^+/Me^{n+}$  [18]. Значення рН – не єдиний фактор, що впливає на ефективність сорбції. На неї також суттєво впливає іонна сила розчину ( $I_p$ ).

У роботі [38] відмічено, що зв'язування металів тим вище, чим нижче значення  $I_p$ . Причому величина  $I_p$  має більший вплив при високих показниках рН, досягаючи максимуму впливу в лужних розчинах.

При сорбції гуміновими кислотами іонів металу частина останніх залишається в постійній концентрації в розчині. На думку дослідників [39], це свідчить про наявність рівноваги між процесами сорбції та десорбції. У роботі [40] здійснені розрахунки константи дисоціації комплексів Г-Ме для двовалентних катіонів міді, цинку и нікелю. Було встановлено, що незважаючи на відмінності в рівнях ґрунту, з якого відбиралися гумінові кислоти, їх показники рКа залишалися величинами одного порядку. Також моделювання різних механізмів комплексоутворення з визначенням констант дисоціації комплексів Г-Ме показано в роботі [41].

Незважаючи на наявність чітко виражених факторів, що визначають сорбційні можливості ГК відносно іонів різних металів, при вивченні взаємодії в реальних об'єктах необхідно також враховувати можливий вплив матриці – інгібуючу дію окремих іонів та їх «конкуренцію» підчас сорбційних процесів. Така «конкуренція» показана в роботі [13] на прикладі сорбції в трійній системі іонів Ni, Ca и Al. Було відмічено інгібувannya комплексоутворення Ni при високих концентраціях іонів кальцію, незважаючи на підвищене значення рН. У роботі [42] подібний ефект показаний у випадку сорбції  $Al^{3+}$ , а також детально розглянута кінетика взаємодії гумінових кислот з іонами  $Tb^{3+}$ ,  $Eu^{3+}$ .

Хоча ГК мають високі сорбційні здібності по відношенню до іонів важких металів, отримані комплекси все одно відносять до токсичних забруднювачів [43]. Існують технологічні процеси глибокої очистки від таких комплексів з використанням ультрафільтрації [44]. Ультрафільтрація із застосуванням мембран є перспективною та вже існуючою технологією фільтрації середовища, яка не змінює її фазовий склад, відрізняється високою енергоефективністю та відносно невеликою вартістю [45]. Однак не всі ефективні мембранні технології є доступними в промисловому масштабі [46]. Суттєвою проблемою є

неможливість ефективного використання мембран в результаті їх забруднення підчас фільтрації [43].

Основна частина досліджень, присвячених застосуванню ГК для зв'язування іонів металів, завершується на стадії отримання комплексів Г-Ме. Суттєво менше уваги приділяється процесам зворотного виділення сорбованих елементів [47]. Незважаючи на велику кількість технологічних процесів переробки, лише деякі виявилися достатньо ефективними на практиці [48]. У цій роботі розглянуті підходи до виділення (концентрування) рідкоземельних елементів з водних розчинів у вигляді сполук з використанням, серед іншого, процесів фільтрації та осадження. Також відомий спосіб виділення золота з бурого вугілля з застосуванням в технологічному процесі сорбційних здібностей ГК [49]. Слід відмітити значну зацікавленість авторів у виділенні рідкоземельних елементів, у порівнянні з іншими [50, 51, 52, 53], хоча значна кількість хімічних методів застосовується при виділенні таких елементів, як мідь, залізо, нікель, цинк та ін. без залучення гумінових кислот [54].

Необхідно зауважити, що термін «адсорбція» цілком придатний до утворенню комплексів ГМ, оскільки включає не тільки «класичне», відносно нестійке поглинання речовин на матеріалах с розвинутою поверхнею, але й загальний переніс матеріалу з рідкої фази на тверду з його зв'язуванням шляхом хімічних та/або фізичних взаємодій [46].

### **Вивчення селективності процесу КУУФ**

Україна має великі запаси різноманітних за властивостями і складом торфів і бурого вугілля, лише незначна частина яких використовується в якості енергетичного палива. У той час на основі вітчизняної сировинної бази можна було б розробити ефективні сорбенти і процеси по виділенню цінних металів, що знаходяться в промислових стоках або забруднених природних джерелах. Для вивчення цього питання нами досліджувалися зразки бурого вугілля Олександрійського родовища і торфу, відібраного у Волинській області. Їх властивості приведені в табл. 1.

Дослідження проводили в непроточній комірці (рис. 2) об'ємом 0,2 дм<sup>3</sup>, площа робочої поверхні мембрани 28,26×10<sup>-4</sup>м<sup>2</sup>, робочий тиск 0,2 МПа,

Таблиця 1. Характеристики об'єктів дослідження та елементний склад

Найменування показника	Символ, одиниця вимірювання	Результати аналізу	
		Торф	Буре вугілля
Волога аналітична	W <sup>a</sup> , %	13,2	16,8
Зольність	A <sup>d</sup> , %	47,7	35,7
Вихід легких речовин на сухий стан палива	V <sup>d</sup> , %	40,6	29,1
Вихід легких речовин на сухий беззольний стан палива	V <sup>daf</sup> , %	77,7	56,6
Масова частка вуглецю	C <sup>d</sup> , %	31,50	38,47
Масова частка водню	H <sup>d</sup> , %	2,81	2,30
Масова частка азоту	N <sup>d</sup> , %	1,70	0,66
Масова частка сірки	S <sub>t</sub> <sup>d</sup> , %	0,25	2,5
Масова частка кисню	O <sub>d</sub> <sup>d</sup> , %	16,04	20,36
Загальний вихід гумінової кислоти на сухий беззольний стан палива	(HA) <sub>s</sub> , %	58,90	87,60

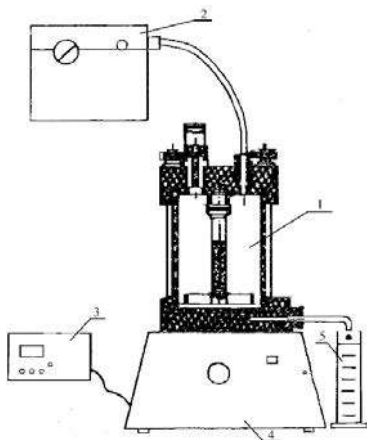


Рисунок 2. Схема установки для фільтрації: 1 – мембранна комірка, 2 – компресор стисненого повітря, 3 – строботахометр, 4 – магнітна мішалка, 5 – пробозбірник

температура навколишнього середовища 20–23 °С. Використовували магнітну мішалку при швидкості обертання 500 об/хв, перемішували розчин для зниження гелеутворення. Використовували в роботі мембрани ПА-10, виробництва «МИФИЛ» (республіка Білорусь).

Для отримання гумінових речовин готували 1 % розчин луку, змішували лужний розчин з вугіллям, при нагріванні, та екстрагували гумінові речовини, за допомогою центрифуги.

У водний розчин, з концентрацією міді 100 мг/дм<sup>3</sup> додавали комплексоутворювач – гумінові речовини з різною концентрацією від 25 до 500 мг/дм<sup>3</sup>, тобто відношення масових концентрацій становить від 0,25:1 до 5:1. Для приготування розчинів використовували дистильовану воду. Розчин відфільтровували по 0,05дм<sup>3</sup>, відкидаючи перші 0,005 дм<sup>3</sup>, щоб уникнути похибки результатів

Об'ємний потік (продуктивність) розраховували за формулою:

$$J_v = \frac{\Delta V}{S \Delta t}, \text{дм}^3/\text{м}^2 \cdot \text{год} \quad (1)$$

Де  $\Delta V$  об'єм фільтрату (дм<sup>3</sup>), що пройшов крізь мембрану площею  $S$  (м<sup>2</sup>) протягом  $\Delta t$  (год).

Концентрацію міді в розчині та у пермеаті визначали методом атомно-абсорбційної спектроскопії, за допомогою «Atomic absorption flame emission spectrophotometer «SHIMADZU» AA-6200».

Концентрацію гумінових речовин в розчинах визначали на спектрофотометрі – «Т60UV-Visible Spectrophotometer – PG Instruments Limited».

Коефіцієнт затримання (селективність) розраховували за формулою:

$$R = \left(1 - \frac{C_n}{C_0}\right) \cdot 100, \% \quad (2)$$

Де  $C_n$  та  $C_0$  концентрація речовини в пермеаті та у початковому розчині відповідно.

Результати експериментів з вивчення селективності процесу КУУФ наведені на рис. 3, як бачимо, що ефективність дії гумінових речовин при

зв'язуванні іонів міді дуже висока і досягає 99,9 % при співвідношенні 1:1 і вище. При цьому дія гумінових речовин, які мають різне походження, практично однаково. У той же час при низьких співвідношеннях 0,25:1 і 0,5:1 можна відзначити значну різницю. Гумінові речовини, отримані з бурого вугілля мають істотно більш високу селективність, ніж торф'яні гумінові речовини. Це очевидно пов'язано з відмінностями в структурі молекул гуматів.

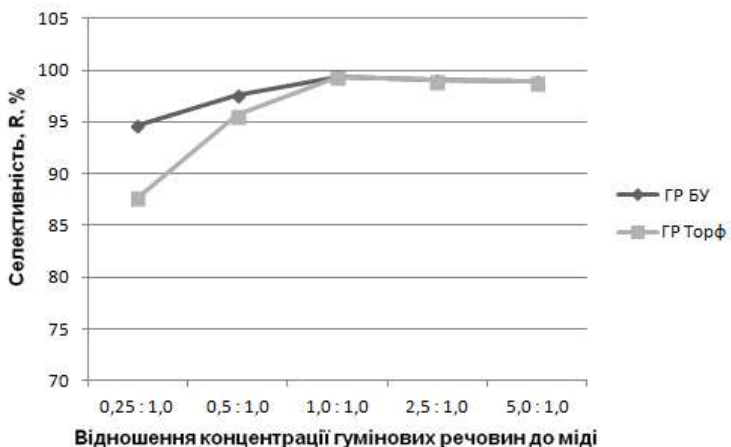


Рисунок 3. Селективність процесу видалення іонів міді з розчину гумінових речовин

Одночасно з визначенням селективності використовуваних комплексоутворювачів визначалася продуктивність процесу на мембранах ПА-10. Результати дослідів наведені на рис. 4, з якого видно, що продуктивність мембрани закономірно падає в порівнянні з її продуктивністю на чистій воді від 100 до 50–60  $\text{дм}^3/\text{м}^2\text{-год}$ . Це, швидше за все, пов'язано із забиванням пор мембрани молекулами гумінових речовин. І в цьому випадку гумінові речовини, отримані з різних продуктів роблять різний вплив на швидкість фільтрації, що свідчить перш за все про різні розміри молекул, що входять до складу гумінових речовин.

Різниця в продуктивності, в нашому випадку, була приблизно однаковою і становила 20–30  $\text{дм}^3/\text{м}^2\text{-год}$

Для перевірки впливу розміру молекул гумінових речовин на процес комплексоутворення-ультрафільтрація нами застосовувалося попереднє фракціонування гуматів шляхом фільтрування їх розчину через мембрани з більшими порами. При цьому в експериментах використовувався розчин гумінових речовин, який знаходяться над мембраною.

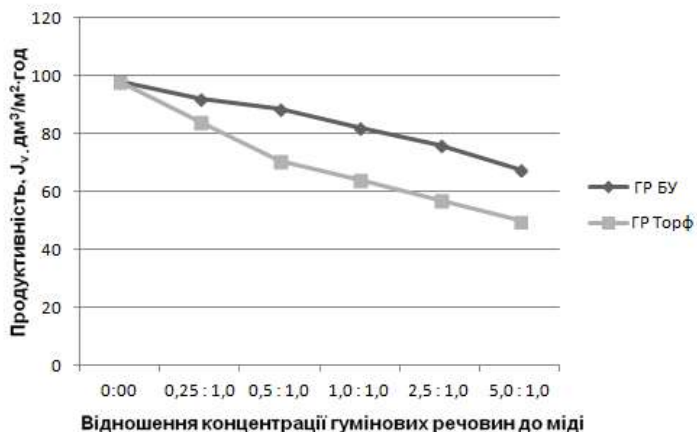


Рисунок 4. Продуктивність процесу видалення іонів міді з розчину гумінових речовин

Отримані результати селективності та продуктивності процесу, з використанням попередньо фракціонованих гумінових речовин, методом комплексоутворення-ультрафільтрація наведені на рис. 5 і 6 відповідно.

Аналізуючи отримані результати досліджень, можна зробити наступні висновки:

1. Гумінові речовини використані в процесі комплексоутворення-ультрафільтрація дозволяють забезпечити глибоке очищення води від іонів міді при ваговому співвідношенні гумінових речовин до міді 1:1.

2. Ефективність дії гумінових речовин в процесі комплексоутворення-ультрафільтрація залежить від виду сировини, з якого вони отримані.

3. Попереднє фракціонування розчину гумінових речовин за розмірами молекул дозволяє на 20–30 % підвищити продуктивність ультрафільтраційних мембран, при цьому селективність процесу до іонів міді залишається практично незмінною.

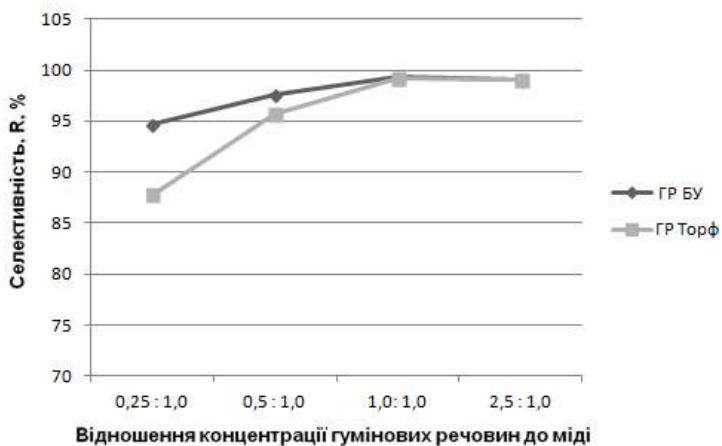


Рисунок 5. Селективність процесу видалення іонів міді з розчину попередньо фракціонованих гумінових речовин

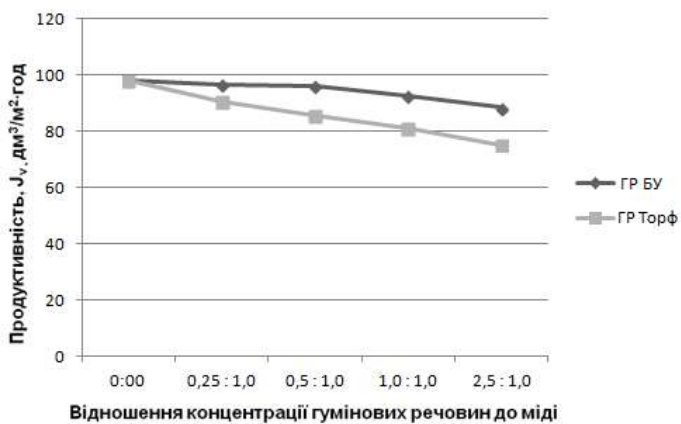


Рисунок 6. Продуктивність процесу видалення іонів міді з розчину попередньо фракціонованих гумінових речовин

## **Використання гумітів для очистки води від високих концентрацій металів**

При дослідженні використовувалися модельні розчини сульфату міді (II) й ацетату свинцю (II) з розрахунковою концентрацією в перерахунку на мідь та свинець близько 400 та 1000 мг/л відповідно. Розчин ацетату свинцю перед використанням фільтрувався. Точний вміст міді та свинцю визначався методом атомно-емісійної спектроскопії з індуктивно-зв'язаною плазмою (ICP-AES) для кінцевих розчинів, приготовлених з модельних.

Виділення гумінових кислот з сировинного матеріалу (торф, буре вугілля) здійснювалося згідно з роботами [55, 56].

Навіски 50 мг гумінових кислот (тут і далі – в перерахунку на органічну складову), виділених з торфу й бурого вугілля (БУ) розчинялися в 0,1 н розчині NaOH (не більш 2 см<sup>3</sup> розчину лугу).

Навіски гумату калію 50 мг китайського виробництва (також в перерахунку на органічну складову) розчинялися в 2 см<sup>3</sup> деіонізованої води.

Для дослідження використовували ГК, виділені з торфу та бурого вугілля, керуючись підходами, описаними в [34, 57], а також комерційні гумати калію. Враховуючи деякі відмінності в умовах досліджень в зазначених роботах, в даній роботі вологість визначалася ваговим методом при 105 °С на протязі 6 годин (до постійної маси), зольність – шляхом витримування в муфельній печі при 800 °С протягом 2 годин (до постійної маси). В подальших розрахунках використовувалися значення маси органічної частини ГК та гуматів калію.

Проведення експерименту здійснювалося поетапно:

1. Для визначення зв'язувальної здатності гуматів 50 см<sup>3</sup> модельних розчинів переносилося в колби на 250 см<sup>3</sup>, добавлялося 150 см<sup>3</sup> деіонізованої води, потім добавлялися розчини гуматів (див. нижче), об'єм розчину доводився водою до мітки й перемішувався. Значення рН розчину сульфату міді (до додавання гуматів) складало 4,40, ацетату свинцю – 5,94. Значення рН після додавання гуматів до розчину сульфату міді складало 4,65–4,72, після додавання до розчину ацетату свинцю – 6,12–6,28.

2. Отримані суміші витримувалися протягом 5 годин, потім відфільтровувалися при атмосферному тиску через паперові фільтри з розміром пор 3–5 мкм. З фільтратів відбиралося по 50 см<sup>3</sup> для визначення залишкового вмісту Cu<sup>2+</sup>, Pb<sup>2+</sup> методом атомно-емісійної спектроскопії з індуктивно-зв'язаною плазмою (ICP-AES).

3. Гумінові залишки на фільтрах промивалися деіонізованою водою та змивалися в скляний стакан об'ємом ~ 200 см<sup>3</sup>, кислотність знижалася шляхом додавання 1 н HNO<sub>3</sub> до значення рН=2,1–2,2. Об'єм розчину доводився деіонізованою водою до об'єму 250 см<sup>3</sup>, розчин витримувався 5 годин, після чого відфільтровувався згідно наведеної вище методології. З фільтратів відбиралося по 50 см<sup>3</sup> для визначення вмісту виділених Cu<sup>2+</sup>, Pb<sup>2+</sup>. Залишок з фільтру кількісно переносився для проведення наступного циклу сорбції-десорбції.

Наведені етапи 1–3 складають один цикл сорбції та регенерації. Всього проводилося три циклу. Вихідні концентрації робочих розчинів складали: Cu<sup>2+</sup> – 84 мг/ дм<sup>3</sup>, Pb<sup>2+</sup> – 216 мг/ дм<sup>3</sup>.

Визначення типу залежності (лінійна, нелінійна) сорбції важких металів проводилось на прикладі свинцю для наведеного вище розчину Pb<sup>2+</sup>. Маси гуматів складали 25, 50, 100, 200 мг. Значення рН розчинів ацетату свинцю після додавання лужних розчинів гуматів складали від 5,98 (для 25 мг гуматів) до 6,46 (для 200 мг гуматів).

У результаті послідовного проведення циклів сорбції-десорбції встановлено, що переважна частина сорбованих іонів Cu<sup>2+</sup>, Pb<sup>2+</sup> виділяється при зниженні рН до значення 2,1–2,2. Частка десорбованої міді склала 85 % (для ГК з бурого вугілля й торфу) та 88 % (для гуматів калію). Частка десорбованого свинцю склала 91 % (для ГК з бурого вугілля), 86 % (для ГК з торфу), 89 % (для гуматів калію).

Дані по сорбції й десорбції (регенерації сорбента) наведені на рис. 7–10. Тип сорбційної залежності проілюстрований на рис. 11. Дані по ступеню очистки (сорбції) при надлишку гуматів наведені в табл. 2.

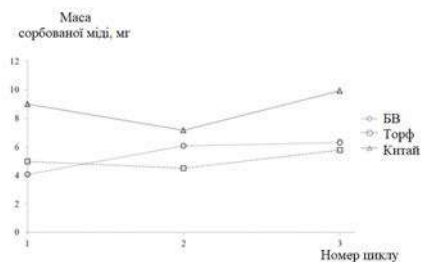


Рисунок 7. Маса сорбованої міді в 3-х циклах сорбції-десорбції

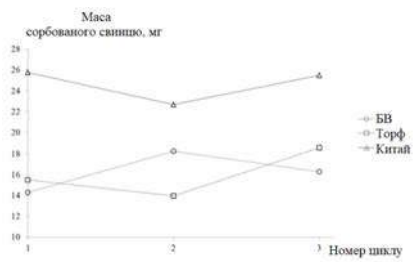


Рисунок 8. Маса сорбованого свинцю в 3-х циклах сорбції-десорбції

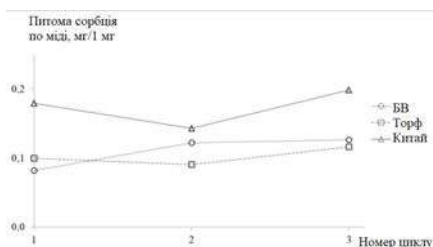


Рисунок 9. Питома сорбція по міді в 3-х циклах сорбції-десорбції

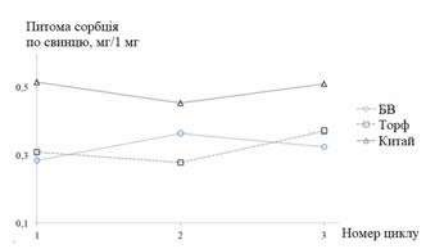


Рисунок 10. Питома сорбція по свинцю в 3-х циклах сорбції-десорбції

Таблиця 2. Частка сорбованого свинцю при визначенні типу сорбційної залежності

Показник	Тип гуматів		
	гумати калію (Китай)	ГК з торфу	ГК з БУ
Доля сорбованого свинцю, %	98,5	97,8	96,9

Також встановлено, що відношення середніх значень питомої сорбції по свинцю та міді склало від 2,8 до 3,1 для різних типів гумінових кислот (гуматів). Близькість вказаних значень до відношення атомних мас свинцю та міді (3,3), на думку авторів, слід вважати ознакою взаємодії іонів міді та свинцю з гуматами в стехіометричному співвідношенні за рахунок хімічної реакції (реакцій).

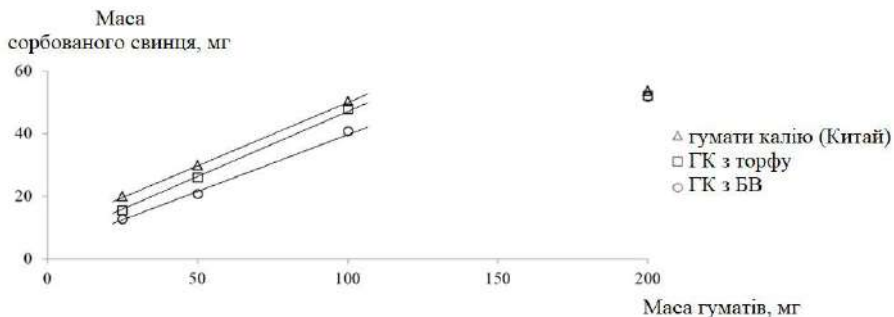


Рисунок 11. Оцінка залежності характеру сорбції від кількості гуматів, доданих в розчин

Аналізуючи рис. 11, слід дійти до висновку, що загальний характер сорбції важких металів (на прикладі свинцю) має залежність, подібну до лінійної. Величина  $R^2$  для перших трьох значень сорбції при лінійному апроксимуванні складає від 0,996 до 0,999. Відхилення від лінійності в області сорбції 200 мг гуматів пояснюється їх надлишком (надлишковою сорбційною здатністю) по відношенню до вмісту свинцю.

Резюмуючи проведений комплекс досліджень, необхідно відмітити наступне:

- гумати лужних металів з різних джерел є ефективним засобом очистки водних розчинів від іонів міді (II) та свинцю (II) в слабкислому середовищі у високих концентраціях. Ступень очистки по свинцю при надлишку гуматів склала 97–99 % для розчинів з концентрацією  $Pb^{2+}$  216 мг/дм<sup>3</sup>;

- гумінові кислоти є здатним до регенерації сорбентом і можуть бути відновлені до повторного використання шляхом зниження рН розчину до значення 2,1–2,2;

- трьохразове використання тих самих ГК у вигляді гуматів натрію або калію показує принципово відтворюваний рівень сорбції від циклу до циклу;

- ступень вилучення міді й свинцю з комплексів Г-Ме, у порівнянні з сорбованою кількістю, склала 85–91 %;

– при наведених умовах експерименту питома сорбція гумінових кислот у вигляді гуматів складала (на органічну складову): 0,10–0,17 мг міді/мг гуматів, 0,31–0,49 мг свинцю/мг гуматів;

– відмінності у значеннях питомої сорбції свинцю та міді співвідносяться для ГК різного походження от 2,8 до 3,1 (при відношенні атомних мас свинцю й міді 3,3 відповідно), що дозволяє припустити відбування хімічної реакції (реакцій) в процесі сорбції в стехіометричному співвідношенні;

– сорбція в умовах експерименту описується лінійною залежністю в системі координат маса сорбованого металу (іонів) – маса гуматів.

### Результати ІЧ-спектроскопії

Реєстрація спектрів в середній ІЧ-області вихідних ГК, гуматів натрію, калію, а також гуматів міді й свинцю показало, коригуючись з літературними даними [26, 32, 33, 34, 58, 59, 60], наступне:

– основні зміни в спектрах гумінових кислот й гуматів калію спостерігалися у діапазоні хвильових чисел 1750–1500  $\text{см}^{-1}$  (див. рис. 12);

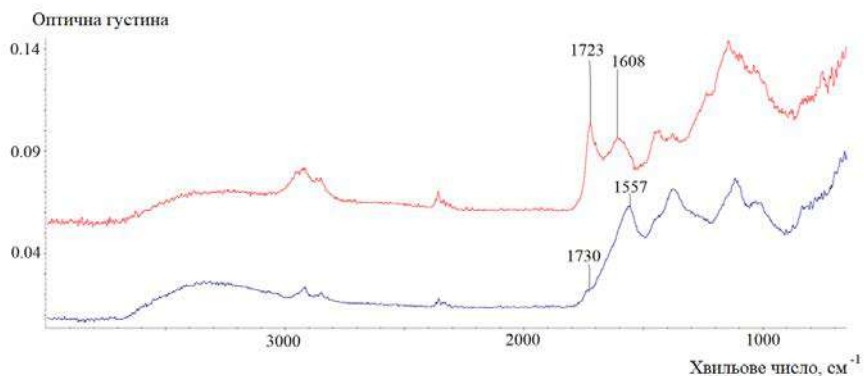


Рисунок 12. ІЧ-спектр гумінової кислоти (червоним – верхній спектр) та отриманого з неї гумату натрію (синім – нижній спектр)

– у спектрі вихідних гумінових кислот присутня інтенсивна смуга (тут и далі – смуга поглинання) при 1720–1730  $\text{см}^{-1}$ , що характеризує вільну

карбоксильну групу, а також інтенсивна смуга при 1600–1610  $\text{см}^{-1}$  (за рахунок наявності ароматичних сполук, присутніх в результаті біодеградації гумінових речовин);

– у спектрах гуматів натрію присутня слабка смуга у вигляді плеча при 1730  $\text{см}^{-1}$ , яка свідчить про наявність залишкових концентрацій вільних карбоксильних груп або їх появу в результаті гідролізу, а також тих, що залишилися після випаровування (всі спектри реєструвалися після висушування речовин (сумішей) при 60  $^{\circ}\text{C}$ ). Враховуючи лужне середовище водних розчинів гуматів, найбільш ймовірною уявляється поява цієї смуги в результаті гідролізу. В спектрі також присутня інтенсивна смуга поглинання при 1550–1560  $\text{см}^{-1}$ , яка відноситься до карбоксил-аніону, що утворився. Смуги поглинання при 1660  $\text{см}^{-1}$  (характерно для карбоксил-аніону) і 1600–1610  $\text{см}^{-1}$  (ароматичні сполуки) відсутні (або маскуються інтенсивною смугою при 1550–1570  $\text{см}^{-1}$ ). Наявність смуги при 1550–1570  $\text{см}^{-1}$  в спектрах гуматів металів відповідає хелатній координації при утворенні зв'язку –COOMe (де Me – іон металу), в який один іон металу зв'язаний з обома атомами кисню, що входять до однієї карбоксильної групи [59];

– ІЧ-спектри гуматів калію в діапазоні 1750–1500  $\text{см}^{-1}$  повторюють в цілому спектри гуматів натрію, за виключенням двох слабких смуг у вигляді «плеча» при 1730 та 1700  $\text{см}^{-1}$  (вільні та димеризовані за рахунок водневих зв'язків карбоксильні групи, відповідно);

– у гуматах міді в діапазоні 1750–1500  $\text{см}^{-1}$  спостерігається наявність слабкої смуги при 1700  $\text{см}^{-1}$ , характерної для димеризованих карбоксильних груп, а також інтенсивної широкої смуги поглинання з максимумом при 1570–1550  $\text{см}^{-1}$ , що повторює спектральну картину, характерну для гуматів натрію, що знаходяться в хелатній координації з утворенням зв'язків з атомами кисню однієї карбоксильної групи (рис. 13);

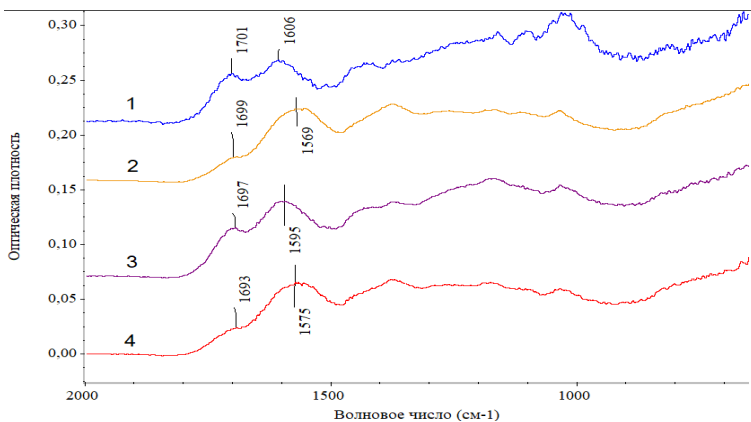


Рисунок 13. ІЧ-спектри ГК після регенерації після циклів 1 і 2 (спектри 1, 3) та гумати міді, отримані під час циклів 2 і 3 (спектри 2, 4)

– у гуматах свинцю повторюється вищенаведений для гуматів міді загальний характер зміни спектральної картини від гумінових кислот до гуматів свинця. Зсув смуги  $1550\text{--}1570\text{ см}^{-1}$  до  $1530\text{--}1540\text{ см}^{-1}$  можливо пояснити в рамках загальної теорії ІЧ-спектроскопії збільшенням приведеної маси (reduced mass) групи атомів, що приймають участь в коливаннях, за рахунок суттєво більшої атомної маси свинцю, у порівнянні з міддю [61];

– у спектрах гумінових кислот, виділених після проведення циклу сорбції-десорбції, присутня інтенсивна смуга близько  $1700\text{ см}^{-1}$ , характерна для димеризованих карбоксильних груп. Полоса при  $1720\text{--}1730\text{ см}^{-1}$  не спостерігалася (може маскуватися через незначну інтенсивність смугою  $1700\text{ см}^{-1}$ ).

Резюмуючи результати ІЧ-спектрометрії, можливо запропонувати наступний основний механізм взаємодії гуматів різного походження з іонами міді (II) й свинцю (II) та структуру сполук:

- вихідні гумінові кислоти містять переважно вільні карбоксильні групи;
- ГК після регенерації (відновлення) містять карбоксильні групи в димеризованому стані, на відміну від свіжоприготовлених ГК;

– при переході від ГК до гуматів лужних металів в водному середовищі (після випаровування при 65 °С) відбувається утворення хелатних зв'язків  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Pb}^{2+}$  з атомами кисню карбоксильної групи. При цьому в суміші, що утворилася, присутня залишкова кількість вільних карбоксильних груп. В гуматах калію присутня також залишкова кількість димеризованих карбоксильних груп;

– внаслідок сорбції міді та свинцю утворюються хелатні комплекси типу –  $\text{COOMe}$ , а залишкові карбоксильні групи присутні в димеризованій формі. Враховуючи, що сорбція відбувається в слабкокислому середовищі, збереження спектральної картини при переході від лужних розчинів гуматів натрію (калію) до слабкокислих гуматів міді (свинцю) свідчить про те, що тип сполуки, яка утворилася, не є наслідком первісної реакції ГК з лугом, а є кінцевим продуктом сорбції  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Pb}^{2+}$ ;

– після видалення іонів  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Pb}^{2+}$  за рахунок подальшого зниження рН хелатні комплекси руйнуються, а утворюються ГК з димерними формами карбоксильних груп – $\text{COOH}$ . В результаті руйнування комплексів в ІЧ-спектрі з'являється смуга при  $1600\text{--}1610\text{ см}^{-1}$ , яка раніше маскувалася інтенсивною смугою хелатного комплексу.

## ВИСНОВКИ

1. Гумінові кислоти в вигляді гуматів лужних металів ефективні для сорбції  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Pb}^{2+}$  у слабкокислому середовищі. Ступінь видалення на прикладі  $\text{Pb}^{2+}$  склала 97–99 % для розчинів з концентрацією  $\text{Pb}^{2+}$  216 мг/дм<sup>3</sup>.

2. Гумінові кислоти є здатним до регенерації сорбентом та можуть бути використані повторно після регенерації, яка здійснюється шляхом зниження рН до значення 2,1–2,2. Встановлена повнота видалення сорбованого металу складає 85–91 %.

3. Використання одних й тих самих ГК у вигляді гуматів натрію або калію показує принципово відтворюваний рівень сорбції протягом трьох циклів сорбції та регенерації.

4. Питома сорбція ГК у вигляді гуматів (у перерахунку на органічну частину) складала:

– 0,10–0,17 мг міді/мг гуматів при рН 4,40–4,65;

– 0,31–0,49 мг свинця/мг гуматів при рН 6,12–6,28.

5. Запропонований механізм сорбції  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Pb}^{2+}$  гуматами включає, як мінімум, відбування стехіометричної хімічної реакції, в результаті якої утворюється хелатний комплекс типу  $-\text{COOMe}$  (де  $\text{Me} - \text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Pb}^{2+}$ ), в якому катіон зв'язаний з двома атомами кисню, що містяться в складі карбоксильного аніону.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Брык М. Т. Ультрафільтрація / М.Т. Брык, Е. А. Цапук //Киев : Наукова думка, 1989. – С. 288

2. Кочкодан О. Д. Особенности извлечения ионов меди из водных растворов методом ультрафильтрации / О. Д. Кочкодан, Г. В. Бойко // *International Scientific Journal Acta Universitatis Pontica Euxinus*. Varna, Bulgaria. – 2016. – Р. 136-140.

3. Криворучко А. П. Извлечение урана из вод с различным соледержанием методом ультрафильтрации / А. П. Криворучко, И. Д. Атаманенко, Л. Ю. Юрлова // *Химия и технология воды*. – 2011. – Т. 33, № 2. – С. 169-185.

4. Водянка В. Р. Применение тиосемикарбазида в процессах баромембранной очистки сточных вод / В. Р. Водянка, А. С. Макаров, М. Н. Балакина, С. Д. Борук, Д. Д. Кучерук // *Химия и технология воды*. – 2011. – Т. 33, № 3. – С. 334-344.

5. Вербич С. В. Видалення міді із водних розчинів методом комплексоутворення-ультрафільтрації / С. В. Вербич, Г. С. Чернокур, М. Т. Брик // *Наук. зап. НаУКМА. Сер. Хім. науки і технології*. – 2005. – Т. 42. – С. 19-25.

6. Малышенко Н. В. Сорбция катионов цинка из водных растворов нативными и модифицированными гуминовыми кислотами / Н. В. Малышенко,

Е. А. Демина, С. И. Жеребцов, О. В. Смотрина, З. Р. Исмагилов // *Химическая технология*. – 2015. – С. 77-83.

7. Лебедева Л. С. Исследование сорбционных свойств гуминовых кислот различного происхождения по отношению к некоторым катионам металлов / Л. С. Лебедева, Н. И. Чернышева // *Успехи в химии и химической технологии*. – Том XXII. – 2008. – №3(83) – С. 113-116.

8. Tipping E Cation binding by humic substances // *Cambridge environmental chemistry series*. – No. 11. – UK: Cambridge University Press. – 2004. – 434 p.

9. Физико-химические характеристики и сорбционные свойства гуминовых веществ бурых углей / Рогова Т. В., Сюдюкова К. В., Переломов Л. В. и др. // *Известия Тульского государственного университета Естественные науки*. – 2013. – Вып. 2. – Ч.1. – С. 273-280.

10. Erdogan S. Interaction of metals with humic acid isolated from oxidized coal // *Polish Journal of Environmental Studies*. – Vol. 16. – No. 5. – 2007. – P. 671-675.

11. Линник П. Н. Жежеря В. А., Линник Р. П. О некоторых особенностях комплексообразования Al(III) с гумусовыми веществами // *Методы и объекты химического анализа*. – 2009. – Т.4. – №1. – С.73-84.

12. Роль фракционирования при изучении фотохимических свойств гумусовых веществ / К. Ришар, Ж. Гийо, Ж.-П. Агуер, и др. // *Российский химический журнал (Ж. Рос. хим. об-ва им. Д. И. Менделеева)*. – 2008. – т. LII. – №1. – С. 107-113.

13. Zhou P., Yan H., Gu B. Competitive complexation of metal ions with humic substances // *Chemosphere*. 2005, Vol. 58. P. 1327–1337.

14. Leboeuf E. J., Weber JR W. Macromolecular Characteristics of Natural Organic Matter. 2. Sorption and Desorption Behavior // *Environ. Sci. Technol*, 2000. Vol. 34. P. 3632 – 3640.

15. Hanke D., Dick P. D. Organic Matter Stocks and the Interactions of Humic Substances with Metals in Araucaria Moist Forest Soil with Humic and Histic

Horizons. Division – Soil Processes and Properties Commission – Soil Chemistry. 2017. Vol. 41. P. 1-20

16. Li J., Ding Y., Wang K., Li N., Qian G., Xu Y., Zhang J., Comparison of humic and fulvic acid on remediation of arsenic contaminated soil by electrokinetic technology // *Chemosphere*, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.125038>.

17. Janoš P., Kormunda M., Novák F., Zivotsky O., Fuitová J., Pilarova V. Multifunctional humate-based magnetic sorbent: Preparation, properties and sorption of Cu (II), phosphates and selected pesticides // *Reactive & Functional Polymers*, 2013. Vol. 73. P. 46-52.

18. Portnova A. V., Volkhin V. V. Copper (II) Ion Immobilization by Humic Acid Converted Into Poorly Soluble Form // *Vestnik of Lobachevsky University of Nizhni Novgorod*, 2008. Vol. 4. P. 71-75.

19. Ding H., Tang L., Nie Y., Ji H. Characteristics and interactions of heavy metals with humic acid in gold mining area soil at a upstream of a metropolitan drinking water source // *Journal of geochemical exploration*, 2018. Vol. 200. P 266-275.

20. Fonseca E. M., Baptista Neto J. A., Mcalister J., Smith B., Fernandez M. A., Balieiro F. C. The Role of the Humic Substances in the Fractioning of Heavy Metals in Rodrigo de Freitas Lagoon, Rio de Janeiro – Brazil. *An Acad Bras Cienc*. 2013. Vol. 85. P. 1289-1301.

21. Lu G., Haes A. J., Forbes T. Z. Detection and identification of solids, surfaces, and solutions of uranium using vibrational spectroscopy // *Coordination Chemistry Reviews*, 2018. Vol. 374. P. 314-344.

22. Yip T. C. M., Yan D. Y.S., Yui M. M.T., Tsang D. C.W., Lo I. M. C. Heavy metal extraction from an artificially contaminated sandy soil under EDDS deficiency: Significance of humic acid and chelant mixture // *Chemosphere*, 2010. Vol. 80. P. 416-421.

23. Boguta P., Sokołowska Z. Interactions of Zn (II) Ions with Humic Acids Isolated from Various Type of Soils. Effect of pH, Zn Concentrations and Humic Acids Chemical Properties. *PLoS ONE*. 2016. Vol. 11. P. 1-20.

24. Bryan N., Jones D., Keepax R., Farrelly D., Abrahamsen L., Beard R., Li N., Weir G. Factors affecting the dissociation of metal ions from humic substances // *Mineralogical Magazine*, 2015. Vol. 79. P. 1397 – 1405.
25. Bryan N. D., Jones D. L.M., Keepax R. E., Farrelly D. H., Abrahamsen L. G., Pitois A., Ivanov P., Warwick P., Evans N. The role of humic non-exchangeable binding in the promotion of metal ion transport in groundwaters in the environment // *Journal of Environmental Monitoring*, 2007. Vol. 9. P. 329–347.
26. Prado A.G.S., Torres J. D., Martins P. C., Pertusatti J., Bolzon L. B., Faria E. A. Studies on copper(II)- and zinc(II)-mixed ligand complexes of humic acid // *Journal of Hazardous Materials*, 2006. Vol. 136. P. 585-588.
27. Wang S., Liu Y., Fan Q., Zhou A., Fan L., Mu Y. Removal of Hg (II) from aqueous solution using sodium humate as heavy metal capturing agent // *Water Science & Technology*, 2016. Vol. 74(12). P. 2946-2957
28. Kim H., Baek K., Kim B., Yang J. Humic substance-enhanced ultrafiltration for removal of cobalt // *Journal of Hazardous Materials*, 2005. Vol. 122. P. 131-136.
29. Tuhkanen T., Ignatev A. Humic and Fulvic Compounds. 2018. Encyclopedia of Analytical Science (Second Edition). 2005. P. 288-298.
30. Li R., Deng H., Zhang X., Wang J., Awasthi M., Wang Q., Xiao R., Zhou B., Du J., Zhang Z. High-efficiency removal of Pb (II) and humate by a CeO<sub>2</sub>–MoS<sub>2</sub> hybrid magnetic biochar // *Bioresource Technology*, 2019. Vol. 273. P. 335-340.
31. Chassapis K., Roulia M., Nika G. Fe (III)–humate complexes from Megalopolis peaty lignite: A novel eco-friendly fertilizer. 2010. Vol. 89. P. 1480–1484.
32. Bahemmat M., Farahbakhsh M., Kianirad M. Humic substances-enhanced electroremediation of heavy metals contaminated soil // *Journal of Hazardous Materials*, 2016. Vol. 312. P. 307-318.
33. Xue S., Zhao Q.-L., Wei L., Ren N.-Q. Behavior and characteristics of dissolved organic matter during column studies of soil aquifer treatment. 2009, Vol. 43. P. 499-507.

34. Hanc A., Enev V., Hrebeckova T., Klucakova M., Pekar M. Characterization of humic acids in a continuous-feeding vermicomposting system with horse manure // *Waste Management*, 2019. Vol. 99. P. 1-11.
35. Cao J, Lam K C, Dawson R W, Liu W X, Tao S. The effect of pH, ion strength and reactant content on the complexation of Cu<sup>2+</sup> by various natural organic ligands from water and soil in Hong Kong // *Chemosphere*, 2004. Vol. 54(4). P. 507-514.
36. Pourret O., Davranche M., Gruau G., Dia A. Rare earth elements complexation with humic acid // *Chemical Geology*, 2007. Vol. 243. P. 128-141.
37. Waller P.A., Pickering W.F. The lability of zinc humate species // *Chemical Speciation & Bioavailability*, 2015. Vol. 3. P. 9-21.
38. Liu A., Gonzalez R. D. Modeling Adsorption of Copper (II), Cadmium (II) and Lead (II) on Purified Humic Acid // *Langmuir*, 2000. Vol. 16. P. 3902 – 3909.
39. Kalina M., Klučáková M., Sedláček P. Utilization of fractional extraction for interactions between humic acids and metals characterization of the interactions between humic acids and metals // *Geoderma*, 2013. Vol. 207-208. P. 92-98.
40. Paul S., Sharma T., Saikia D., Saikia P. P., Borah D., Baruah M. K. Evaluation of pKa Values of Soil Humic Acids and their Complexation Properties // *International Journal of Plant & Soil Science*, 2015. Vol. 6(4). P. 218-228.
41. Evans L.J., Sengdy B., Lumsdon D. G., Stanbury D.A. Cadmium adsorption by an organic soil: a comparison of some humic – metal complexation models // *Chemical Speciation & Bioavailability*, 2015. Vol. 15. P. 93-100.
42. Lippold H., Eidner S., Kumke M. U., Lippmann-Pipke J. Diffusion, degradation or on-site stabilisation – Identifying causes of kinetic processes involved in metal–humate complexation // *Applied Geochemistry*, 2012. Vol. 27. P. 250-256.
43. Kanagaraj P., Mohamed I. M.A., Huang W., Liu C. Membrane fouling mitigation for enhanced water flux and high separation of humic acid and copper ion using hydrophilic polyurethane modified cellulose acetate ultrafiltration membranes // *Reactive and Functional Polymers*, 2020. Vol. 150. A. 104538. P. 1-11.
44. Cao D., Wang X., Wang Q., Fang X., Jin J., Hao X., Iritani E., Katagiri N. Removal of heavy metal ions by ultrafiltration with recovery of extracellular polymer

substances from excess sludge // *Journal of Membrane Science*, 2020. Vol. 606. A. 118103. P. 1-11.

45. Membrane Technology for Water and Wastewater Treatment, Energy and Environment. Editors: Ismail A. F., Matsuura T. 2016. Taylor & Francis Group, London, UK. 319 p.

46. Al-Saydeha S. A., El-Naasa M. H., Zaidib S. J. Copper removal from industrial wastewater: A comprehensive review // *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 2017. Vol. 56. P. 35-44.

47. Royer-Lavall'ee A., Neculita C.M., Coudert L. Removal and potential recovery of rare earth elements from mine water // *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 2020. Vol. 89. P. 47-57.

48. Amato A., Becci A., Birloaga I., De Michelis I., Ferella F., Innocenz V., Ippolito N.M., Pillar Jimenez Gomez C., Vegliò F., Beolchini F. Sustainability analysis of innovative technologies for the rare earth elements recovery // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2019. Vol. 106. P. 41-53.

49. Bratskaya S., Volk A., Ivanov V., Ustinov A., Barinov N., Avramenko V. A new approach to precious metals recovery from brown coals: Correlation of recovery ecacy with the mechanism of metal–humic interactions // *Geochimica et Cosmochimica acta*, 2009. Vol. 73. P.3301-3310.

50. Ziemkiewicz, P.; He, T.; Noble, A.; Liu, X. Recovery of Rare Earth Elements (REEs) from Coal Mine Drainage; West Virginia Mine Drainage Task Force Symposium: Morgantown, WV, USA, 2016. P. 1-7.

51. Ayora, C.; Macías, F.; Torres, E.; Lozano, A.; Carrero, S.; Nieto, J. M.; Pérez-López, R.; Fernández-Martínez, A.; Castillo-Michel, H. Recovery of rare earth elements and yttrium from passive-remediation systems of acid mine drainage // *Environ. Sci. Technol*, 2016. Vol. 50, 8255–8262.

52. López J., Reig M., Gibert O., Torres E., Ayora C., Cortina J.L. Application of nanofiltration for acidic waters containing rare earth elements: Influence of transition elements, acidity and membrane stability // *Desalination*, 2018. Vol. 18. P. 33-44.

53. Wei X., Zhang S., Shimko J., Dengler R. W. Mine drainage: Treatment technologies and rare earth elements // *Water Environment Research*, 2019. Vol. 91. P. 1061-1068.
54. Agrawal A., Kumari S., Sahu K. K. Iron and Copper Recovery/Removal from Industrial Wastes: A Review // *Ind. Eng. Chem. Res.*, 2009. Vol. 48, 6145–6161.
55. Chu M., Huang Z., Xu B., Fang T., Duan H. Preparation, characterization and salt-resistance of a coal based super absorbent composite // *Mining Science and Technology*, 2010. Vol. 20. P. 864–871.
56. Swift, R.S. (1996) Organic Matter Characterisation, in D.L. Sparks (eds.), *Methods of Soil Analysis. Part 3. Chemical Methods*, Soil Sci. Soc. Am. Book Series no. 5. P. 1011–1069.
57. Lamar R.T., Olk D. C., Mayhew L., Bloom P. R. A New Standardized Method for Quantification of Humic and Fulvic Acids in Humic Ores and Commercial Products // *Journal of AOAC International*, 2014. Vol. 97, No. 3. P. 721-730
58. Chassapis K., Roulia M., Nika G. Fe (III)–humate complexes from Megalopolis peaty lignite: A novel eco-friendly fertilizer. 2010. Vol. 89. P. 1480–1484.
59. Ioannou E.F., Mountrichas G., Pispas S., Kamitsos E. I. Lithium Ion Induced Nanophase Ordering and Ion Mobility in Ionic Block Copolymers // *Macromolecules*, 2008. Vol. 41. P. 6183-6190
60. Prado A.G.S., Miranda B.S., Dias J. A. Attachment of two distinct humic acids onto a silica gel surface. *Colloids and Surfaces A // Physicochem*, 2004. Vol. 242. P. 137–143.
61. Diem M. *Modern Vibrational Spectroscopy and Micro-Spectroscopy: Theory, Instrumentation and Biomedical Applications*. Wiley, 2015. 430 p.

## **ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ НАДІЙНОГО ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ВІЙСЬКОВИХ ОБ'ЄКТІВ**

*Шевченко С. Ю., Данильченко Д. О., Дривецький С. І.*

### **Вступ**

Якість забезпечення військових об'єктів електроенергією безпосередньо залежить від надійності роботи розподільних електричних мереж, які є ключовою ланкою в системі електропостачання. Для підвищення ефективності, технічного рівня і безпеки розподільних мереж необхідно використання науково обгрунтованих технічних рішень і технологій у питаннях передачі електричної енергії повітряним лініями електропередавання. Для підвищення надійності на повітряних лініях середніх класів напруг 6 – 35 кВ широко застосовуються захищені проводи (ПЛЗ), які мають суттєві переваги перед лініями з неізолюваними проводами [1-5].

В останні роки спостерігається значне збільшення активності блискавки на планеті та на території України зокрема. Це призводить до більш частого ураження об'єктів електроенергетики, втому числі повітряних ліній електропередавання всіх класів номінальної напруги. З початком масового застосування на розподільних ПЛ 6 – 35 кВ захищених проводів виникла необхідність прийняття обов'язкових технічних заходів по їх блискавкозахисту.

Особливістю проблеми блискавкозахисту ПЛЗ є те, що для мережі 6 – 35 кВ однофазне замикання на землю не є аварійною ситуацією та не підлягає обов'язковому відключенню. В разі відсутності спеціальних заходів, при дуговому перекритті ізолятора лінії, супроводжуваному пробоем твердої ізоляції проводу, дуга промислової частоти, що утворюється з великою ймовірністю, не має можливості переміщатися по проводу (як при неізолюваних проводах) і горить в місці пробоею ізоляції до моменту відключення лінії або до погасання під дією інших чинників. Час горіння електричної дуги на ПЛ середніх класів напруги буває досить довгим, тому, що однофазне замикання для них не є аварійною ситуацією та не підлягає обов'язковому відключенню. Досить часто

у місці проборою може виникнути повторне загоряння дуги. Це може призвести до псування ізоляції проводу, пошкодження ізолятора лінії і до перегорання проводу, що підтверджується досвідом експлуатації ліній з захищеними проводами. Оскільки на лінії з неізольованими проводами дуга під впливом електродинамічних сил здатна переміщатися одним зі своїх кінців уздовж проводу, фактор пошкодження проводу внаслідок теплового впливу дуги був малозначним і ніяк не впливав на формування концепції блискавкозахисту ПЛ. У разі ж ПЛЗ запобігання перегорянню проводу стає основним чинником, що визначає необхідність обов'язкового застосування тих чи інших блискавкозахисних заходів.

### **Експериментальні дослідження уражуваності ПЛ і ПЛЗ**

Блискавкозахист повітряних ліній електропередавання середніх класів напруги має суттєві відмінності від захисту ПЛ 110 – 750 кВ. Для середніх класів напруги проблеми блискавкозахисту в першу чергу обумовлені малою електричною міцністю лінійної ізоляції. Прийнято вважати, що практично будь яка блискавка призведе до виникнення на ізоляції перенапруг достатніх для її перекриття. Другим фактором, що впливає на блискавкостійкість ПЛ є їх невелика висота. Це обумовлює достатньо не велику кількість прямих ударів блискавки в проводу ПЛ. Ще однією специфічною відмінністю ураження ПЛ середніх класів напруги блискавкою є суттєва кількість індукованих перенапруг, які призводять до перекриття ізоляції ПЛ. Цей факт зумовлює необхідність врахування при розрахунках блискавкостійкості ПЛ.

Останніми роками в світі отримали широке застосування захищені проводу. Використання таких проводів при спорудженні ПЛ, як було показано вище має ряд переваг. Однак з точки зору блискавкозахисту їх використання призвело до необхідності застосування спеціальних засобів захисту від блискавки [6].

Вивченню блискавкозахисту ПЛ середніх класів напруги, ПЛ із захищеними проводами присвячено багато робіт різних дослідників. Однак всі

вони базуються на відомих методиках та присвячені, як правило засобам захисту проводів від можливих перегорянь, які обумовлені особливостями існування дуги на проводах із ізоляційним покриттям. Самі методики, які отримані на базі обробки досвіду експлуатації та досліджень на моделях, не удосконалюються. Деякі дослідники висувають гіпотези про суттєве зменшення або ж відсутність уражень ПЛ з захищеними проводами прямими ударами блискавки. Такі гіпотези пов'язані з тим, що умови розвитку зустрічного лідеру від проводу до каналу блискавки є відмінними від аналогічних умов для неізольованих проводів. Це припущення дає можливість стверджувати, що кількість прямих ударів блискавки в провoda ПЛ буде суттєво відрізнятись для неізольованих та захищених проводів. В той же час в нормативних документах по розрахунку блискавкоуражуваності ПЛ та ПЛЗ рекомендують розрахунок блискавкоуражуваності ПЛЗ проводити так само як і для ПЛ, таким чином не враховується такий чинник, як тип проводу, тобто приймають значення блискавкостійкості неізольованих та захищених проводів однаковими [7].

Для вивчення питання відмінності кількості прямих ударів блискавки в ПЛ з захищеними проводами нами була споруджена великогабаритна модель ПЛ з неізольованими та захищеними проводами, та виконані дослідження ймовірності ураження ПЛ.

Нами було проведено п'ять серій експериментів з різними конфігураціями ПЛ, які дозволили визначити різницю вірогідності ураження неізольованих та захищених проводів.

### ***Перша серія експериментів***

У першій серії експериментів було виконано порівняння ймовірності прямого удару блискавки в провoda, для ліній на яких одночасно розташовані захищені та неізольовані проводи. Для дослідження блискавкоуражуваності, на першому етапі, необхідно створити рівні умови для ураження ПЛ та ПЛЗ прямим ударом блискавки.

Параметри моделі були визначені виходячи з висоти орієнтування блискавки та мали такі значення: електрод знаходився на висоті 1 метра від

поверхні «землі», на висоті 20 см від поверхні «землі» були розташовані захищений і неізолюваний провід, на відстані 90 см один від одного, електрод, що імітує блискавку встановлювався посередині між проводами, по 45 см від кожного. При проведенні експериментальних досліджень, у якості джерела напруги було використано ГН 2,4 МВ. Створена експериментальна модель у високовольтній залі Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», згідно цих параметрів, наведена на рис. 1.



*Рисунок 1. Фотографія ураження неізолюваного проводу на великогабаритній моделі під час першої серії експериментів.*

За результатом 100 дослідів всі розряди потрапили в неізолюваний провід. Такий результат дозволяє зробити висновок про різну вірогідність ураження неізолюваних та захищених проводів. Отримані результати підтверджують гіпотезу про різні механізми ураження неізолюваних та захищених проводів блискавкою та дозволяють виказати припущення про підвищену блискавкостійкість ліній із захищеними проводами за рахунок ускладнення розвитку зустрічного лідера від проводу.

### *Друга серія експериментів*

Для перевірки гіпотези про те, що захищені проводи не уражуються прямими ударами блискавки, ми вирішили ускладнити умови уражуваності для захищеного проводу. Друга серія експериментів була виконана на аналогічній моделі лінії на яких одночасно розташовані і захищені і неізольовані проводи. Основною відмінністю цієї серії експериментів було те, що електрод який імітує блискавку встановлювався на відстані 30 см від захищеного і 60 см від неізольованого. Таке розташування електрода, що імітує блискавку дозволяє досліджувати ймовірність прямого удару в проводи лінії при виникненні каналу блискавки в довільному місці простору. Параметри моделі мали ті ж значення, що і в першій серії експериментів.

Було виконано чотири серії експериментів по 100 дослідів у кожній, отримані результати мають такий вигляд: в двох серіях експериментів, 70 ударів довелось в неізольований провід і 30 ударів в захищений, в одній 68 ударів в неізольований провід і 32 в захищений і в останній 73 в неізольований провід і 27 в захищений.

З отриманих результатів видно що ймовірність прямого удару в захищений провід існує та, в середньому, становить 30 % від загальної кількості ударів. Таким чином можна зробити висновок, що імовірність ураження проводу з ізоляційним покриттям значно менша, ніж ураженість неізольованого проводу. Це пов'язано з тим, що ізоляційне покриття захищених проводів не дає можливості для розвитку зустрічного лідеру з поверхні проводу. Що значно зменшує кількість прямих ударів блиски в ПЛЗ у порівнянні з ПЛ. Також ця ймовірність залежить від місця, де розташовано електрод, що імітує блискавку.

### *Третя серія експериментів*

Для дослідження ймовірності прямого удару блискавки у ПЛЗ при найтяжчих умовах, коли електрод, що імітує блискавку розташованої безпосередньо над захищеним проводом ми проводимо третю серію експериментів.

У третій серії експериментів було виконано порівняння ймовірності прямого удару блискавки для ліній на яких одночасно підвішені і захищені і неізолювані проводи. Параметри моделі були аналогічні першим двом експериментам. А електрод що імітує блискавку встановлювався над захищеним проводом.

Було виконано 5 серій по 100 дослідів кожна (табл. 1). У двох з них ймовірність прямого удару в захищений провід склала 50 % від загальної кількості ударів, в наступних серіях ймовірність коливалася в межах 47 – 51 %. Отримані результати підтвердили висновок, що ймовірність ураження блискавкою захищеного проводу, за наявності на лінії також неізолюваного проводу, залежить від умов для розвитку зустрічного лідеру та розташування електроду, що імітує блискавку.

*Таблиця 1. Вірогідність ураження захищених проводів прямим ударом блискавки при різних місцях розташування електроду, що імітує блискавку*

Кількість серій	Електрод, що імітує блискавку знаходиться на відстані від захищеного і неізолюваного проводу		
	Посередені, між захищеним і неізолюваним (45 см)	Ближче до захищеного проводу 30 см і 60 см до неізолюваного	Над захищеним проводом, 90 см до неізолюваного
1	0	27	47
2	-	30	50
3	-	32	48
4	-	30	51
5	-	-	50

Тим не менш, навіть за найважчих умов для захищеного проводу, ймовірність його ураження склала 50%, що говорить про підвищену блискавкостійкість, ніж у неізолюваного проводу.

Як видно з табл. 1 ймовірність ураження захищеного проводу залежить від місця розташування електроду, що імітує блискавку. При рівних умовах, ймовірність ураження неізолюваного проводу більше, ніж захищеного.

#### ***Четверта серія експериментів***

У четвертій серії експериментів визначалася ймовірність удару блискавки в захищений провід за однакових величинах відстаней від проводу до електроду, що імітує блискавку і від зазначеного електроду до «землі». Висота підвісу електроду й проводу були тими ж, що і в попередніх експериментах. Створена експериментальна модель, наведена на рис. 2.

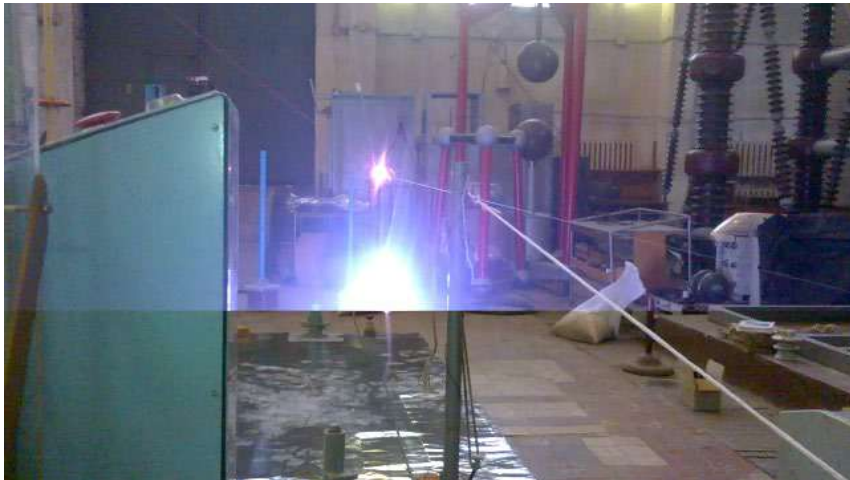


*Рисунок 2. Фотографія великогабаритної моделі для четвертої серії експериментів*

Було проведено чотири серії по 100 дослідів кожна. Ймовірність удару в захищений провід змінювалася в межах від 26 % до 32 % від загальної кількості ударів. Отримані результати добре ілюструють наявність ударів модельної іскри в поверхню «землі», що може бути підтвердженням правильності обраної схеми та методики експериментальних досліджень.

### *П'ята серія експериментів*

При виконанні п'ятої серії експериментів визначалася ймовірність удару блискавки в неізолюваний провід при однакових відстанях від проводу до електрода що імітує блискавку і від зазначеного електрода до «землі». Створена експериментальна модель, наведена на рис. 3 Проведення подібних серій експериментів пов'язано з порівнянням імовірностей ураження неізолюваних та захищених проводів. Подібне порівняння необхідне для підтвердження наявності відмінностей у механізмах ураження захищених та неізолюваних проводів та врахування таких відмінностей при розрахунках блискавкостійкості ПЛ на етапі прийняття проектних рішень.



*Рисунок 3. Фотографія великогабаритної моделі для п'ятої серії експериментів*

Висота підвісу електрода й проводу були тими ж, що і в попередніх експериментах. Було проведено 3 серії по 100 дослідів кожна. Імовірність удару в неізолюваний провід змінювалася в межах від 70 % до 72 % від загальної кількості ударів. Отримані результати дозволяють зробити висновок про суттєві відмінності значень вірогідності ураження захищених та неізолюваних проводів. Така відмінність дозволяє виказати припущення що ПЛ із захищеними проводами має набагато ліпші показники блискавкостійкості ніж ПЛ

з неізолюваними проводами. Вірогідність ураження проводів прямим ударом блискавки наведена у табл. 2.

*Таблиця 2. Вірогідність ураження проводів прямим ударом блискавки при різних типах проводів*

Кількість серій	Електрод, що імітує блискавку знаходиться на рівній відстані від захищеного або неізолюваного проводу до «землі»	
	Вірогідність ураження захищеного проводу	Вірогідність ураження неізолюваного проводу
1	27	71
2	30	72
3	26	70
4	32	-

### **Проведення експериментальних досліджень для визначення зони захоплення блискавки проводами лінії.**

Для проведення експериментальних досліджень, згідно з теорією проведення експерименту побудуємо матрицю експерименту, з урахуванням факторів, що впливають на процес ураження повітряної лінії прямим ударом блискавки. До основних факторів відносяться струм блискавки ( $I_0$ ), напруга на лінії ( $U$ ), та тип проводу (захищений чи неізолюваний). Матриця експерименту наведена у табл. 3.

На геометричні параметри експериментальної моделі тип проводу впливу не має.

В табл. 3 прийняті наступні позначення:

- |                               |                               |
|-------------------------------|-------------------------------|
| «-» – мінімальне значення:    | «+» – максимальне значення:   |
| - 10 кА для струму блискавки; | - 20 кА для струму блискавки; |
| - 6 кВ для напруги лінії;     | - 35 кВ для напруги лінії;    |
| - неізолюваний провід.        | - захищений провід.           |

Таблиця 3. Матриця експерименту для дослідження зони захоплення прямого удару блискавки

	$I_6$	$U$	Тип проводу
1	-	-	-
2	-	+	-
3	+	-	-
4	+	+	-
5	-	-	+
6	-	+	+
7	+	-	+
8	+	+	+

Для проведення експериментів було обрано вихідні параметри які відповідають основним принципам моделювання та не ускладнюють проведення експериментів.

Нами були розраховані коефіцієнти моделювання для визначення геометричних параметрів моделі і визначено, що коефіцієнт подібності для струмів 10 кА дорівнює 43, а для 20 кА – 68.

Таким чином було розраховано модельну висоту підвісу проводу, вона буде дорівнювати наступним значенням:

$$\begin{aligned}
 h_1 = h_5 = 0,2 \text{ м}; & & h_2 = h_6 = 0,35 \text{ м}; \\
 h_3 = h_7 = 0,13 \text{ м}; & & h_4 = h_8 = 0,22 \text{ м}.
 \end{aligned}$$

### Результати експериментальних досліджень

При проведенні серії експериментів у якості джерела напруги було використано ГН 2,4 МВ. Було проведено 8 серій експериментів, по 300 експериментів в кожній серії. Кількість експериментів в серії визначалася похибкою визначення імовірності та була визначена за формулою

$$\Delta b = \pm t S_{\{b\}}$$

Для зручності представлення отримані результати внесені в табл. 4

Таблиця 4. Модельні результати експериментальних досліджень

Висота підвісу проводу, $H_{\text{під}}$ , м	Відстань, з якої провід приймає прямі удари блискавки, $X$ , м	
	СП 3 1*50-20	АС – 50/8
0,2	0,25	0,37
0,35	0,425	0,62
0,13	0,17	0,245
0,22	0,27	0,4

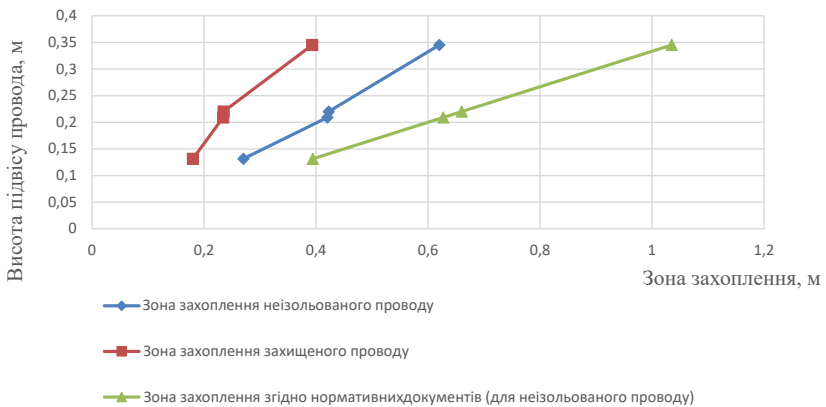
Результати експериментів показали, що для ліній з захищеними проводами зона захоплення в півтора рази менше ніж зона захоплення неізолюваного проводу. Під зоною захоплення розуміють площу з однієї сторони ПЛ з якої вона збирає прямі удари блискавки. Розмір цієї зони, як правило, визначається нормативними документами. Діючі нормативи визначають залежність ширини зони захоплення від висоти повітряної лінії. Приклад такої ширини при однаковій висоті ПЛ зображено на рис. 4.



Рисунок 4. Експериментальні значення ширини зони захоплення блискавки для різних типів проводів

Як видно з отриманих результатів, для неізолюваного проводу зона захоплення становить не  $3 \cdot H_{\text{під}}$ , а  $2 \cdot H_{\text{під}}$ , що свідчить про те, що, лінії середніх класів напруги уражуються прямими ударами блискавки менше раз на рік, ніж кількість таких уражень отримано на основі методів розрахунку згідно нормативних документів. Така відмінність може суттєво вплинути на показники блискавкостійкості подібних ліній, що обумовлює можливість зміни підходів до блискавкозахисту ліній середніх класів напруги.

Як видно з табл. 4, зона захоплення проводом СП – 3 1 \* 50-20 майже в 2 рази менше зони захоплення неізолюваного проводу і не багато перевищує висоту підвісу лінії, таким чином можна говорити, що зона захоплення захищеного проводу дорівнює  $H_{\text{під}}$ . Даний факт показує, що  $N_{\text{пуб}}$  для ПЛЗ значно менше, ніж для ПЛ.



*Рисуюнок 5. Експериментальні значення захоплення блискавки для різних типів проводів в порівнянні з нормативним значенням*

Отримані, в результаті експериментальних досліджень, та розраховані за методикою нормативних документів (для неізолюваного проводу) значення ширини зони захоплення блискавки наведені на рис. 5. З цього рисунку добре видно, що значення ширини зони захоплення отримані при розрахунках значно

перевищують аналогічні дані отримані експериментально. Цей факт дає змогу стверджувати, що лінії середніх класів напруги мають значно меншу кількість прямих ударів блискавки в проводи ніж це визначено методикою розрахунку. Таким чином на етапі проектування слід враховувати експериментально отримані значення ширини зон захоплення, що призведе до скорочення розрахункової кількості прямих ударів блискавки.

### **Створення комбінованої лінії електропередавання**

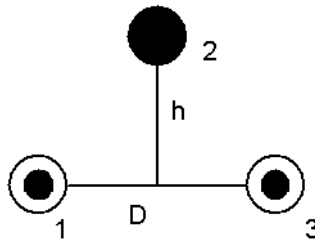
Всі методи захисту ПЛ від грозових перенапруг передбачають встановлення додаткового обладнання, наявність якого призводить до зниження експлуатаційної надійності ПЛ за рахунок збільшення кількості елементів, які можуть вийти з ладу. Також встановлення захисних пристроїв вимагає додаткових фінансових витрат та експлуатаційних затрат. Окрім того слід зазначити, що, як правило, блискавка вражає одну фазу ПЛ. Режим роботи ПЛ середніх класів напруги передбачає ізольовану чи компенсовану нейтраль. У такому випадку однофазне замикання на землю не визначається нормативними документами як аварійна ситуація. Цей факт, а також суттєве зменшення відстаней між фазами ПЛЗ, нормоване ПУЕ, дає можливість розглядати інший спосіб захисту від блискавки чим встановлення захисних апаратів.

Для більш ефективної та економічної експлуатації ПЛ з захищеними проводами пропонуємо використовувати особливість ліній середніх класів напруги, а саме використання на цих лініях ізольованої нейтралі. На ПЛ середніх класів напруги прямий удар блискавки призведе до перекриття ізоляції лінії та однофазного замикання на землю зі 100 % вірогідністю, через малу імпульсну міцність ізоляції ПЛ. Дуга, що виникає між проводом і землею для таких класів напруги має властивість гаснути за рахунок зовнішніх факторів.

Проведені експериментальні дослідження ураженості ПЛ та ПЛЗ на великогабаритних моделях показали відмінності в ураженні неізольованого та

захищеного проводів. За результатами експериментів було визначено, що неізолюваний провід уражується з більшою вірогідністю, ніж захищений [5-15].

Подібні результати наштотхнули на думку про створення лінії, що має в своїй конструкції як захищені, так і неізолюваний провід. Це обумовлено тим, що зона захоплення неізолюваного проводу більше зони захоплення захищеного проводу, що призведе до суттєвого перерозподілу ударів блискавки в неізолюваний провід. Цей факт було підтверджено експериментальними дослідженнями, що дає можливість розробити систему блискавкозахисту ПЛЗ за допомогою використання одного неізолюваного проводу в якості фазного провідника. При такій конструкції ПЛЗ можливо передбачити, що удари блискавки, переважно, будуть в неізолюваний провід. Оскільки, в основному, дроти на опорі розташовуються в трикутнику, середня фаза вище крайніх, то неізолюваним проводом рекомендуємо виконати саме її, а крайні фази виконати захищеними проводами, що дозволить захистити захищені проводи від ураження прямими ударами блискавки та перегорання їх за рахунок наявності електричної дуги. Ця обставина дасть можливість суттєво підвищити експлуатаційні характеристики та безпеку такої лінії. Запропонований варіант розташування проводів на опорі показаний на рис. 6.



*Рисунок 6. Схема розташування проводів комбінованої лінії електропередавання*

*1 – захищений провід, 2 – неізолюваний провід, 3 – захищений провід,  
 $h$  – перевищення середнього дроту над крайніми,  
 $D$  – відстань між крайніми проводами*

Для підтвердження можливості використання фазного неізолюваного проводу в якості блискавозахисного пристрою у великому високовольтному залі Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» була створена експериментальна модель комбінованої лінії електропередавання з урахуванням критеріїв подібності.

Для побудови моделі було обрано такі параметри:

струм блискавки дорівнює 10 кА;

напруга лінії – 6 кВ.

Було проведено дослідження блискавоураженості комбінованої лінії з урахуванням зміни  $h$  і  $D$ .

Для проведення експериментальних досліджень була створена матриця експерименту, табл. 5.

Експериментальна модель мала наступні параметри: висота підвісу електрода, що імітує блискавку дорівнювала 1 м, висота підвісу проводів 0,2 м, перевищення середньої фази над крайніми змінювалося в межах від 0 до 0,2 м, відстань між крайніми фазами змінювалося від 0,1 до 0,3 м, зміщення електрода, що імітує блискавку щодо осі лінії змінювалося від 0 до 0,4 м, середня фаза була виконана проводом АС – 50/8, крайні фази виконані проводом СП-3 1\*50 – 20.

Було виконано 8 серій експериментів, по серії на кожну конфігурацію, по 100 дослідів у кожній серії. За умови знаходження електрода над лінією, всі удари були в неізолюваний провід, за умови знаходження електрода на відстані 0,4 м (зона захоплення неізолюваного проводу) від осі лінії, половина ударів була в неізолюваний провід, половина в землю. Отримані результати дають можливість стверджувати, що ступінь захисту ПЛЗ неізолюваним фазним проводом є досить високим, як показано вище, при проведенні 800 експериментів не було отримано жодного розряду в захищений провід, що, на наш погляд, пов'язано з різними механізмами ураження захищеного та неізолюваного проводів прямим ударом блискавки. При наближенні лідерного

каналу блискавки до неізолюваного проводу на його поверхні збирається заряд протилежного знаку ніж у блискавки, що сприяє іонізації повітря в напрямку каналу лідера та полегшення умов розвитку зустрічного розряду від проводу до лідера, у випадку ж захищеного проводу, за наявності заряду наведеного блискавкою такої ж величини процес іонізації та розвиток зустрічного лідера практично неможливий, що обумовлено наявністю захисного покриття та ускладнення процесів іонізації.

Таблиця 5. Матриця експерименту

	$h$	$D$	$X$
1	-	-	-
2	-	+	-
3	+	-	-
4	+	+	-
5	-	-	+
6	-	+	+
7	+	-	+
8	+	+	+

де, «-» – мінімальне значення:

- 0 м для перевищення середньої фази над крайніми;
- 0,1 м для відстані між крайніми фазами;
- 0 м для зміщення електрода імітує блискавку від осі лінії.

«+» – максимальне значення:

- 0,2 м для перевищення середньої фази над крайніми;
- 0,3 м для відстані між крайніми фазами;
- 0,4 м для зміщення електрода імітує блискавку від осі лінії (зона захоплення неізолюваного проводу).

Виконані експериментальні дослідження комбінованої лінії довели високу ефективність захисту захищених проводів від перегорання за допомогою

використання неізольованого фазного проводу в якості блискавкоприймача. Таким чином нам вдалося виправити основний недолік ПЛЗ з точки зору блискавкозахисту, а саме можливе перегорання захищених проводів внаслідок прямого удару блискавки в них. Цей факт дає нам можливість стверджувати, що комбінована лінія, при збереженні усіх переваг ПЛЗ буде мати таку ж блискавкостійкість, як і ПЛ.

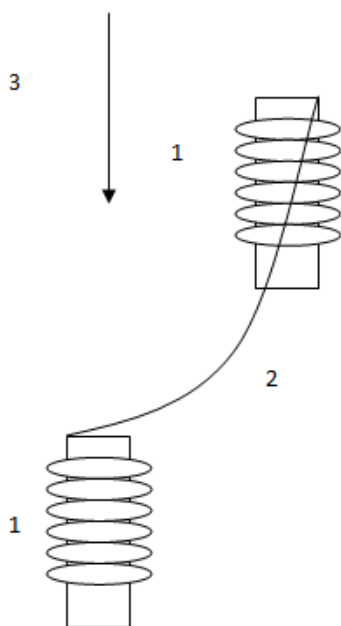
Експлуатація такої лінії не потребує встановлення спеціальних пристроїв для захисту ПЛ та ПЛЗ. Наявність серед трьох фазних проводів одного, який використовується в якості блискавкоприймача, може бути використана для подальшого підвищення блискавкостійкості ПЛ за рахунок підвищення електричної міцності фазної ізоляції. Крім того використання фазного проводу в якості блискавкоприймача дозволить суттєво збільшити фронт хвилі наближаючої на обладнання підстанції за рахунок втрат на імпульсну корону, та дозволить використати це при розрахунку надійності роботи підстанції. Таким чином, на наш погляд, використання комбінованих ліній вирішить декілька питань блискавкозахисту та суттєво скоротить витрати на спорудження ПЛЗ, що для України є досить актуальним питанням.

### **Експериментальні дослідження форми та величини індукованих перенапруг**

У лабораторії надвисоких напруг кафедри «Передача електричної енергії» Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» була створена модель ПЛ (рис. 7), що дозволяє змодельовати лінію з захищеними та голими проводами. Ця модель дає можливість виконати експерименти для дослідження форми і величини наведених перенапруг, що виникають в повітряних захищених лініях (ПЛЗ), при ударах блискавки поблизу ліній при різних геометричних параметрах ліній.

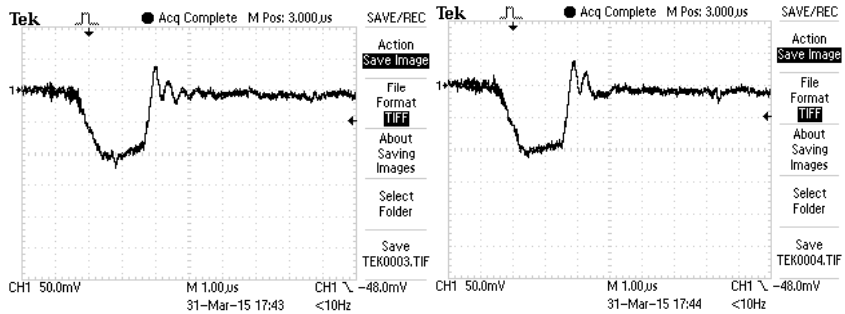
У ході проведення дослідів, параметри моделі були задані наступними: електрод знаходився на висоті 1 м від поверхні «землі»; на висоті 0,35 м від

поверхні «землі» був підвішений захищений провід, підключений до ємкісного дільника напруги 500 кВ з оптичною розв'язкою, до якої був підключений осцилограф фірми Tektronix модель TDS 1012; електрод, що імітує блискавку був зрушений на відстані 0,8 м від підвішеного захищеного проводу. Зарядна напруга ГІНа становила 80 кВ на поверх, що в загальній сумі становило близько 1 МВ поданого на електрод. Було проведено 100 дослідів.



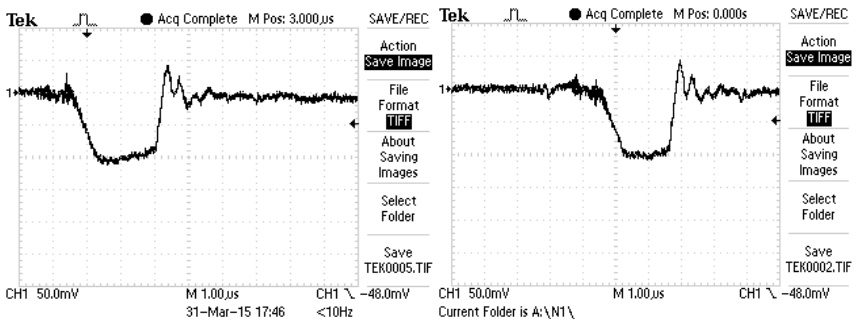
*Рисунок 7. Загальний вигляд моделі  
1 – опорний ізолятор, 2 – досліджуємий провід,  
3 – електрод, що імітує блискавку*

У результаті досліджень були отримані наступні осцилограми (рис. 8):



а)

б)



в)

г)

Рисунок 8. Величини наведених перенапруг  
а), б) величина наведеної напруги складала 20 кВ;  
в), г) форма наведеної на захищеному проводі перенапруги

На рис. 8 «в» видно форму напруги, яка подавалася на електрод і форму напруги, яке навелася на проводі в ході експерименту рис. 8 «г». Добре видно, що фронт хвилі сильно не змінився. Це дозволяє зробити висновок про практично повний збіг фронтів наведеного та подаємого імпульсів напруги.

Отримані осцилограми показують, що форма поданого і наведеного імпульсів напруги, не змінилася. Величина наведеної напруги при описаних параметрах моделі виявилася рівною 20кВ, що свідчить про досить високий ступінь зв'язку проводу і каналу імпульсного розряду [11,12].

### **Дослідження індукованих перенапруг на ізольованому проводі при різних параметрах.**

Наступним етапом було визначення величини наведеної перенапруги на ізольованому проводі при різних параметрах моделі.

При проведенні експериментальних досліджень було обрано такі параметри моделі:

- Електрод розташований на висоті 1 м від поверхні «землі»;
- На різних висотах (від 30 до 60 см) від поверхні «землі» був підвішений захищений провід, підключений до ємкісному дельника напруги 500 кВ з оптичною розв'язкою, до якого був підключений осцилограф;
- Електрод, що імітує блискавку був зрушений на відстані від 50 до 120 см від підвішеного захищеного проводу;
- Зарядна напруга ГН становила 50 кВ на поверх, що в загальній сумі склало близько 600 кВ.

Як вказувалося вище вимірювання такого сигналу проводилися за допомогою ємнісного дільника з ємністю 5пФ, яка істотно нижче, ніж ємність проводу. Таке співвідношення ємностей дає можливість стверджувати, що дільник не вносить похибки в вимірювання. Було проведено 20 дослідів для кожного варіанту моделі, з цих 20 дослідів було знайдено середнє значення наведеної блискавкою перенапруги.

У результаті дослідів були отримані експериментальні залежності наведених напруг при різних параметрах моделі, котрі наведені на рис. 9 – 12.

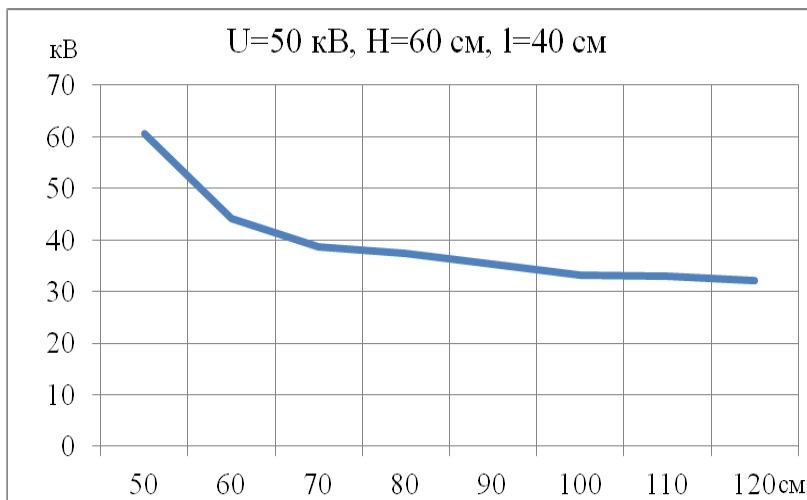


Рисунок 9. Напряга 600 кВ (50 кВ на поверх), висота підвісу проводу  $H = 60 \text{ см}$ , і віддалення електрода імітуючого блискавку на  $l = 40 \text{ см}$

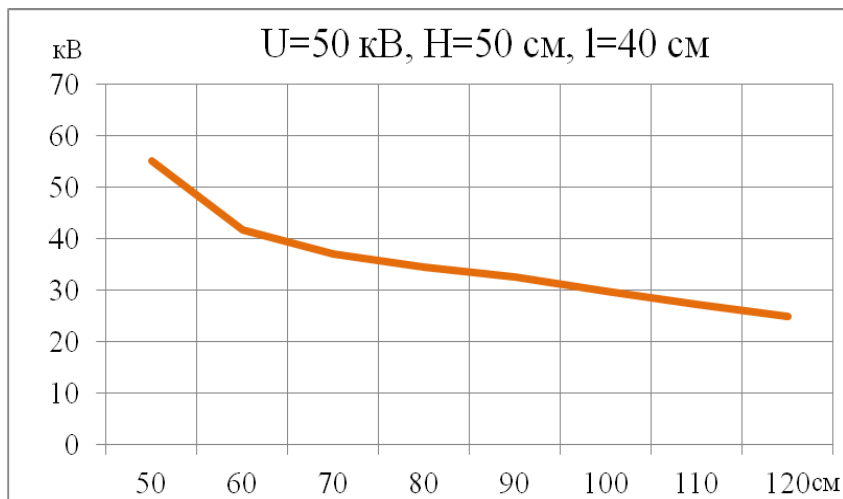
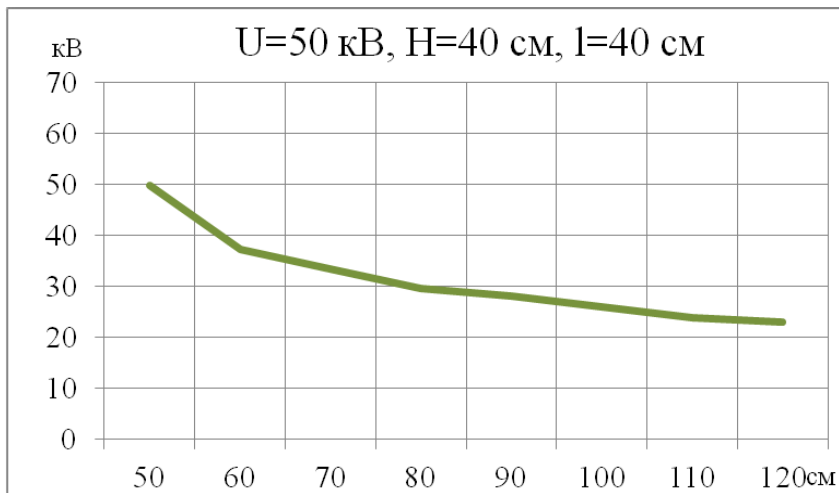
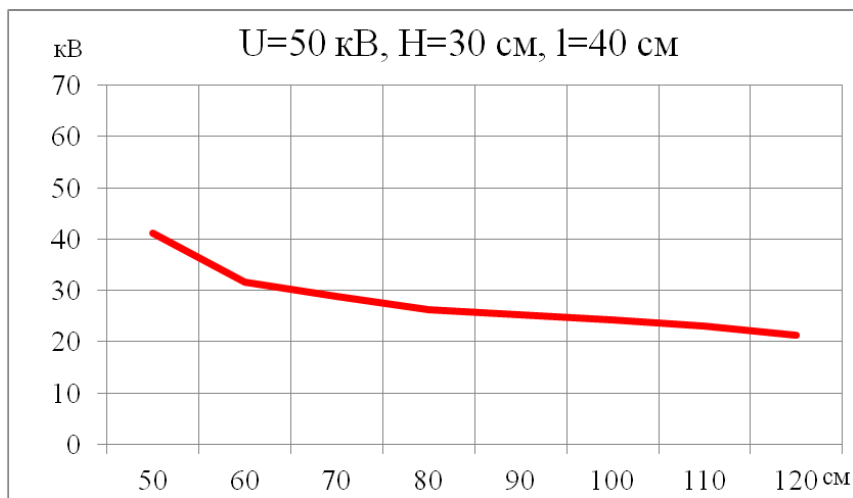


Рисунок 10. Напряга 600 кВ (50 кВ на поверх), висота підвісу проводу  $H = 50 \text{ см}$ , і віддалення електрода імітуючого блискавку на  $l = 40 \text{ см}$



*Рисунок 11. Напряга 600 кВ (50 кВ на поверх), висота підвісу проводу  $H = 40 \text{ см}$ , і віддалення електрода імітуючого блискавку на  $l = 40 \text{ см}$*



*Рисунок 12. Напряга 600 кВ (50 кВ на поверх), висота підвісу проводу  $H = 30 \text{ см}$ , і віддалення електрода імітуючого блискавку на  $l = 40 \text{ см}$*

У результаті проведених експериментів, була виміряна величина наведеної напруги, яка перебувала в межах від 21 кВ до 61кВ для різних варіантів моделі.

Для обчислення розрахунків грозоупорності ПЛЗ необхідно отримати залежність ймовірності виникнення наведених перенапруг, що мають величини небезпечні для ізоляції подібних ліній.

Використовуємо отримані результати зон захоплення для різних типів проводів для подальшого дослідження величини наведених перенапруг.

При проведенні експериментальних досліджень параметри моделі були наступними:

- електрод був на висоті 1 м від поверхні «землі»;
- на висотах 0,135м, 0,21м, 0,35 м, 0,22 м від поверхні «землі» був по черзі підвішений захищений та неізольований провід, підключений до ємкісного дельника напруги 500 кВ з оптичною розв'язкою, до якого був підключений осцилограф;
- електрод, що імітує блискавку був зрушений на різних відстанях від підвішеного проводу різних типів;
- зарядна напруга гін становила 55 кВ на поверх, що в загальній сумі склало близько 660 мВ, яка була подана на електрод.

При впливі напруги ГІН на електрод, що імітує блискавку, відбувався пробій повітряного проміжку «електрод-земля». Це призводило до виникнення на досліджуєному проводі індукованої перенапруги. В ході проведення експериментів було виконано по 50 дослідів для кожної варіації моделі, що дало змогу отримати більш детальні значення наведених перенапруг.

### **Дослідження $U_{50}$ % системи «провід-ізолятор»**

Наступним етапом досліджень, було знаходження 50%-ої перенапруги, що виникала при пробіє системи «провід-ізолятор». Використовуючи метод «вгору-вниз», який передбачає прикладання до об'єкта однакових за формою і різних для кожного з наступних дослідів за значенням напруг у залежності від результату

попереднього прикладання. Якщо при прикладанні даної напруги на об'єкті випробування стався повний розряд, то значення напруги при подальшому прикладанні зменшують, якщо ж повного розряду не було, то значення напруги збільшують [16].



*Рисунок 13. Загальний вигляд системи «ізолюваний провід-ізолятор»*

Даний метод випробування, який застосовують в основному, при випробуваннях імпульсними напругами, має ту перевагу, що вимагає найменшого числа дослідів для визначення 50 %-ої розрядної напруги з заданою точністю. Його застосовують, головним чином в тих випадках, коли значення стандартного відхилення унормовано і потрібно визначити тільки 50 % -у розрядну напругу.

У ході проведення експерименту було проведено 3 серії по 30 випробувань на системі «провід-ізолятор», вигляд якої позначений на рисунку 13

Один з кінців досліджуемого проводу був ізолюваний для виключення крайового ефекту, інший – підключений до дільника напруги 1200 кВ з виходом на цифровий осцилограф.

Під час проведення експериментів виникла проблема обумовлена тим, що при пробі ізоляції необхідно замінити досліджуємих провід. Слід зазначити, що ізоляційне покриття проводів є неоднорідним, тому необхідно було провести декілька серій експериментів.

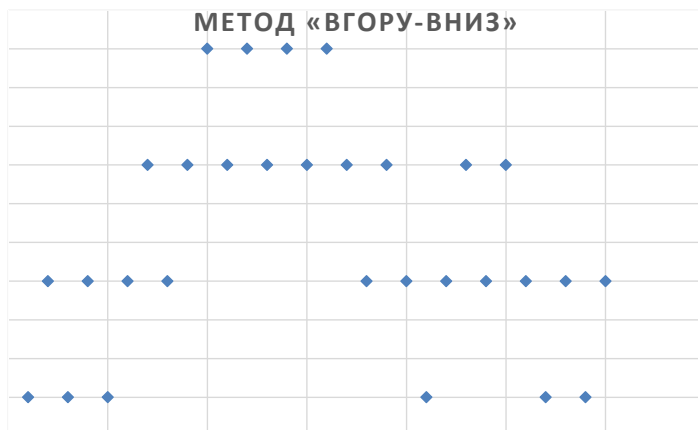


Рисунок 14. Графік по результатам досліджень методу «вгору-вниз»

Було знайдено значення 50%-ої розрядної перенапруги системи «провід-ізолятор», яке дорівнювало 235 кВ.

Потім ми визначили величину, 50%-ої розрядної перенапруги окремо нашого досліджуємого проводу. Знаючи імпульсну перенапругу (100 кВ), що витримує ізолятор ШФ-10Г, який ми обрали для дослідження, можна вирахувати напругу витримувану нашим проводом СП 3 1\*50-20, яка дорівнює 135 кВ. Отримані результати дають можливість стверджувати, що електрична міцність покриття проводу становить приблизно 40 кВ / мм.

Отримані результати дозволяють уточнити розрахунки грозо стійкості повітряних ліній електропередавання на етапі проектування [17].

## ВИСНОВКИ

Питання забезпечення надійного електропостачання військових об'єктів залишається вкрай актуальним і стратегічно важливим. Проведені експериментальні дослідження дозволяють розробити повітряну лінію середніх класів напруги, що буде спроможна витримати зовнішні втручання завдяки двом крайнім фазам виконаними захищеним проводом та не буде вимикатися від дії атмосферних перенапруг.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Kashem, Saad Bin Abul Microgrid in military applications. / Kashem Saad Bin Abul, et al. // 2018 IEEE 12th International Conference on Compatibility, Power Electronics and Power Engineering (CPE-POWERENG 2018). – IEEE. – 2018.
2. Merrill Smith Key connections: The US department of energys microgrid initiative. / Smith Merrill, Dan Ton // *IEEE Power and Energy magazine*. – 11.4. – 2013. – P. 22-27.
3. Nordman Bruce Local power distribution with nanogrids. / Nordman Bruce, Ken Christensen // 2013 International green computing conference proceedings. IEEE, 2013.
4. Kwasinski Alexis Availability evaluation of micro-grids for resistant power supply during natural disasters. / Kwasinski Alexis, et al.// *IEEE Transactions on Smart Grid*. – 3.4, – 2012, – P. 2007-2018 pp.
5. Su Wencong Energy management systems in microgrid operations. / Su Wencong, Jianhui Wang // *The Electricity Journal*. – 25.8. – 2012. – 45-60 pp.
6. Sergey Shevchenko Defeat of overhead lines transmission networks with protected wires from lightning strike. / Sergey Shevchenko, Dmitriy Danilchenko // 2015 International Young Scientists Forum on Applied Physics (YSF), 1-4 pp., DOI: 10.1109/YSF.2015.7333228
7. Shevchenko S. Development of the method for determining the number of direct lightning strikes in overhead lines with protected wires. / S. Shevchenko,

D. Danylchenko // IEEE First Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON), 479 – 482 pp. DOI: 10.1109/UKRCON.2017.8100293

8. Shevchenko S. Influence of Direct Lightning Strikes and Lightning Strikes Near Power Lines with Protected and Non-Insulated Wires / S. Shevchenko; D. Danylchenko; S. Dryvetskyi; K. Minakova// 2018 IEEE 3rd International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS) 17 – 22 pp. DOI: 10.1109/IEPS.2018.8559565

9. Shevchenko S. Experimental Research of the Electrical Strength of the Insulated System “Protected Wire-Line Insulator” / S. Shevchenko, D. Danylchenko, S. Dryvetskyi // 2020 IEEE 4th International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS), Istanbul, Turkey, 2020, pp. 83-87 DOI: 10.1109 / IEPS51250.2020.9263212

10. Gurevich Vladimir Protection of Telecommunication Systems in Electric Power Facilities from Electromagnetic Pulse (EMP). / Gurevich Vladimir// Journal of Communications Technology, Electronics and Computer Science. – 14. – 2017. – 1-5 pp.

11. Шевченко С. Ю. Ураження блискавкою повітряних ліній з захищеними проводами. / С. Ю. Шевченко, Д. О. Данильченко, С. И. Дривецкий // Sciences of Europe. – Praha, Czech Republic. – VOL. 1, No 19 (19) (2017). – 52–57 pp.

12. Шевченко С. Ю. Поражаемость воздушных линий распределительных сетей с защищенными проводами грозовыми разрядами. / С. Ю. Шевченко, Б. Ф. Ермоленко, Д. А. Данильченко, С. И. Дривецкий // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Збірник наукових праць. Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність. – Х.: НТУ «ХПІ». – 2016. – №3 (1175). – С. 101–107.

13. Шевченко С. Ю. Дослідження вражаємості грозовими розрядами повітряних ліній із захищеними та неізольованими проводами. / С. Ю. Шевченко, О. Є. Піроті, О. М. Довгалюк, Д. О. Данильченко, Б. Ф. Ермоленко // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. – 2015. – №. 164. – С. 31-33.

14. Шевченко С. Ю. Анализ возможности создания физической модели поражаемости линии электропередачи прямыми ударами молнии. / С. Ю. Шевченко, Д. А. Данильченко, А. М. Равлик // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Збірник наукових праць. Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність. – Х. : НТУ «ХПІ». – 2016.

15. Danylchenko D. Study of the effect of atmospheric overvoltages on overhead lines of medium voltage classes. / D. Danylchenko // Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies. – Kharkiv: NTU "KhPI". – 2017. – 32(1254). – 19-24 pp. DOI:10.20998/2413-4295.2017.32.03.

16. Дривецький С. І. Дослідження індукованих перенапруг на лініях електропередавання напругою 6-35 кВ з різними типами проводів // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. – 2018. – №195. – С. 65 – 68.

17. Gurevich Vladimir The issues of electronic equipment grounding at the power facilities / Gurevich Vladimir // Protecting Electrical Equipment. – De Gruyter. – 2019. – 149-170 pp.

## ДИСКРЕТНО-КОНТИНУАЛЬНІ МЕТОДИ ЗМІЩЕННЯ ЕЛЕМЕНТІВ МАШИН ВІЙСЬКОВОГО ТА ЦИВІЛЬНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ

*Ткачук М. А., Кравченко С. О., Ткачук М. М., Грабовський А. В.,  
Веретельник О. В.*

### **Вступ**

Забезпечення високих тактико-технічних і технічних характеристик (ТТіТХ) об'єктів військової та цивільної техніки постала перед Україною як актуальна, важлива та невідкладна для вирішення проблема, зважаючи на кричущі виклики військово-політичної та соціально-економічної ситуації. Враховуючи високу вартість і тривалість традиційних розробок нової техніки, як ефективну та дієву альтернативу у роботі запропоновано принципово новий підхід до вирішення назрілих проблем. Він полягає у тому, що задля досягнення підвищених ТТіТХ об'єктів військової та цивільної техніки основна увага зосереджується на їхніх основних елементах – двигунах та агрегатах, що є визначальними для досягнення ключових характеристик. Беручи до уваги, що наразі конструкторські заходи поліпшення характеристик цих двигунів та агрегатів себе значною мірою вичерпали, то раціональним є створення нових проектно-технологічних рішень, які дають приріст окремих показників не на одиниці, а на десятки відсотків та в рази. Для цього, у свою чергу, потрібно задіяти механізми, що проявляються на макрорівні, працюють – на мікрорівні, а ефект, ними породжуваний, – на нанорівні.

Отже, виникає ланцюг "об'єкт-агрегат-технологія", що може бути об'єднаним у єдине ціле та активованим тільки на основі створення нового наукового системного підходу до теоретичних досліджень, який природним чином може охопити макро-, мікро- та наномасштаби, а також, що є надзвичайно важливим, – призвести до нових результативних високотехнологічних рішень.

І, нарешті, усі розробки необхідно збалансувати із можливостями вітчизняної промисловості, а також умовами подальших етапів життєвого циклу – експлуатації, модернізації та відновлення.

До сьогодні завершеного вирішення окресленої проблеми в усіх перелічених розрізах не існувало. Так, наприклад, вітчизняні важкі бойові броньовані машини типу танка Т-64 у процесі модернізації до рівня бойової машини "Булат" потребують суттєвого підвищення потужності двигуна типу 5ТДФ. Це, у свою чергу, спричиняє підвищені навантажувальні режими роботи окремих вузлів та деталей, особливо тих, що перебувають у рухомому силовому контакті. Це ж стосується і двигунів серій 3ТД, 6ТД тощо. Отже, забезпечивши нові проектно-технологічні рішення щодо найбільш навантажених елементів двигуна, отримуємо бойову машину із сучасним рівнем ГТХ, причому в умовах вітчизняних підприємств, без надмірних капітальних вкладень та у стислі терміни. Без таких підходів вирішення подібного класу проблем – неефективне.

Таким чином, поставлена проблема зводиться до створення нових технологій, що не здійснюють високого температурного впливу на зміцнювану деталь, дають підвищення потужності, зносостійкості та ресурсу двигунів і агрегатів військової та цивільної техніки. Це створить можливість підвищити конкурентоспроможність української машинобудівної продукції на світовому ринку, а також рівень національної безпеки країни.

### **Аналіз методів інженерії поверхні деталей та шляхи забезпечення підвищення технічних і тактико-технічних характеристик військової та цивільної техніки**

Задля визначення напрямків досліджень здійснено аналіз стану технологій зміцнення поверхневих шарів деталей машин, що знаходяться в умовах рухомого контактного сполучення, їх переваг і недоліків. Як ілюстраційні об'єкти прийняті, у першу чергу, найбільш навантажені та відповідальні деталі двигунів внутрішнього згоряння (ДВЗ) (колінчасті вали, вкладиші підшипників ковзання, поршні, гільзи). Ці деталі в основному лімітують ресурс, працездатність і економічність роботи двигунів внутрішнього згоряння. У той же час вони є яскравими прикладами високонавантажених деталей машин, що

труться, і тому всі виявлені проблеми, обставини та явища можна віднести до всього класу таких деталей і технологій їх зміцнення.

Відмови деталей транспортної техніки при нормальних умовах експлуатації відбуваються внаслідок різних видів зносу, корозії, ерозії, кавітації, старіння матеріалу тощо.

Сучасний стан теорії робочих процесів машин, наявність досконалої експериментальної техніки для визначення робочих навантажень і високий рівень розвитку прикладної теорії пружності при існуючих уявленнях про фізико-механічні властивості матеріалів дають можливість забезпечити достатню міцність деталей машин у нормальних умовах експлуатації. У той же час найбільш поширеною причиною відмов транспортних засобів та їх виходу з ладу є не поломка, а зношування і пошкодження робочих поверхонь. Так, практика експлуатації машин і досвід свідчать про те, що у 80 випадках із 100 вони виходять з ладу через відмови вузлів тертя, пов'язаних із зношуванням.

Зокрема, певний огляд існуючих методів описаний у монографії [1]. Аналізуючи наведені в [1] способи зміцнення та відновлення ресурсу елементів конструкцій, слід виділити загальні для них недоліки: стандартні зміцнювальні способи і традиційні технології отримання зносостійких покриттів у більшості своїй не забезпечують необхідного рівня зносостійкості і втомної міцності деталей одночасно; зміцнювальні покриття не володіють високою міцністю зчеплення з деталлю; стандартні зміцнювальні процеси досить енергоємні; процеси, пов'язані з нанесенням покриттів, викликають розігрів основного металу, що призводить до його знеміцнення, і можуть супроводжуватися утворенням тріщин внаслідок різкого градієнта температур; технології, що використовують об'ємну термічну обробку, супроводжуються деформаціями деталей, для усунення яких необхідні збільшені припуски під механічну обробку. Таким чином, існуючі способи зміцнення не дають можливості отримати необхідний рівень експлуатаційних характеристик трибосистем, що зумовлює значно менший ресурс відновлених деталей порівняно із існуючими вимогами. Відмічене стосується не тільки відновлення валів, але й виготовлення, оскільки

існуючі технології їх зміцнення теж не забезпечують необхідного поєднання властивостей серцевини та поверхні деталей.

Останніми роками активний розвиток отримали процеси дискретної обробки поверхонь, які дають можливість отримати на них чергування у заданій послідовності (дискретно) високоміцних і пластичних мікроділянок, аналогічно до природних композиційних матеріалів, армованих твердими та міцними фазами. Як відомо, така структура забезпечує високу конструкційну міцність матеріалу, тобто дає змогу одночасно отримати високі показники міцності, пластичності, в'язкості руйнування. Для пар тертя завдання значно ускладнюється, оскільки необхідно не просто підвищити конструкційну міцність матеріалу деталей, а й забезпечити високі трибологічні характеристики їхніх поверхонь, що працюють у контакті з контртілом, і при цьому не збільшити зношувальної здатності матеріалу, тобто не призвести до прискореного зношування.

Останнім часом інтенсивне поширення набули кластерні покриття. Суть методу нанесення кластерних покриттів полягає в тому, що на функціональні поверхні виробу методом електрохімічного осадження наноситься покриття з хрому або нікелю з ультрадисперсними зносостійкими частинками карбиду кремнію та/або алмазу (4-6 нм). Подібна структура може утворитися також при локальному впливі на матеріал механічних, теплових, магнітних та інших полів, які ініціюють у його різних ділянках фазові та структурні перетворення.

Ефективне застосування у різних галузях техніки для підвищення зносостійкості деталей отримав спосіб створення поверхонь із рівномірно розташованими мікрозаглибинами. Він досить успішно використовується у циліндрах двигунів, підшипниках, плунжерах тощо. Мікрозаглибини, головним чином, зумовлюють контактні здатності поверхні – покращують змащування, підвищують опір адгезії та корозії, скорочують період припрацювання. На відміну від термічного впливу на «шорсткість», для таких поверхонь введено поняття «мікрорельєф і макрорельєф» поверхні, що характеризує наявність у поверхневому шарі дискретних або неперервних

заглиблень. До найбільш досліджених методів створення рельєфу належить вібраційне прокатування (пластична деформація). Мікро- та макрозаглибини на поверхні деталі можна розглядати як резервуари, де зосереджується мастило. Для порівняльної оцінки маслозатримувальної здатності поверхонь із рельєфом запропонований термін «мастилоємність». Розвинена система заглиблень забезпечує можливість проникнення мастильного середовища в зону тертя, сприяє утворенню вторинних структур. Рівномірний мікро- та макрорельєф забезпечує локалізацію абразивних частинок середовища і продуктів зношування, знижує ймовірність заклинювання пари тертя. Циркулююча у заглибленнях олива поліпшує охолодження контактної поверхні.

Дослідження проф. Б. А. Ляшенка (Інститут проблем міцності ім. С. Писаренка НАН України) в області адгезійного та когезійного зношування поклали початок розвитку нових технологій нанесення дискретних зносостійких покриттів на деталі електроіскровим легуванням. Основна суть створення зносостійких дискретних покриттів полягала в нанесенні на робочу поверхню деталі дискретного (острівкового) покриття та його подальшому пластичному деформуванню. Незважаючи на значне збільшення зносостійкості матеріалу деталей з дискретними покриттями, цьому методу також притаманні недоліки. Так, деталі з дискретними покриттями відрізняються підвищеною зношувальною здатністю через високу шорсткість поверхні зміцнених деталей.

Протягом останніх десятиліть у різних галузях науки і техніки здійснювалися спроби розробки нових нетрадиційних способів зміцнення деталей, які були б позбавлені багатьох недоліків класичних технологій. Таким новим процесом може стати спосіб формування зносостійкого поверхні деталі, в основі якого лежить дискретне зміцнення електроіскровим методом.

Враховуючи відмічене, розробка науково-технологічних основ підвищення ресурсу деталей силових вузлів машин військового та цивільного призначення за рахунок використання дискретного зміцнення і споріднених технологій є перспективним напрямком підвищення їх триботехнічних характеристик.

Аналіз публікацій [1–31] дає підстави для наступних висновків.

Проблеми, що відмічені вище, потребують свого вирішення на основі принципово нових методів зміцнення, оскільки ресурс конструктивних змін, як правило, уже давно вичерпано. Зокрема, низка досліджень, у тому числі і авторів цієї роботи, показали, що ключем до цієї проблеми є створення так званих дискретних, тобто несучільних, покриттів. Несучі «острівці» такого покриття мають необхідні фізико-механічні властивості (міцність, зносостійкість, контактна жорсткість тощо). Ці ділянки міцно утримуються на основі, оскільки мають у своїй основі перехідний шар, близький за своїми фізико-механічними властивостями і до серцевини, і до покриття. У той же час «острівець» покриття може пристосовуватися до мінливих умов роботи пари тертя і відносно незалежно від «острівців»-сусідів пружно зміщуватися в ту чи іншу сторону. Матеріал основи зношується інтенсивніше, ніж зносостійкі складові поверхні деталі відповідно до закону Шарпі. У результаті вже у період припрацювання пари на поверхні деталі утворюються різновисокі ділянки: зносостійкі несучі і більш м'які – матеріалу матриці, які шляхом самоорганізації створюють систему лабіринтів для мастила.

При виборі методу створення зносостійкого міцного покриття автори зупинилися на досить простій ідеї електроіскрового легування, яке за своєю природою є дискретним процесом, здатним зміцнити і підвищити зносостійкість будь-яких, в тому числі і великих, поверхонь важконавантажених деталей машин при їх виготовленні і багаторазовому ремонті.

Крім того, увага авторів також зосереджена на методі корундування поверхонь деталей з алюмінієвих сплавів, який дає можливість реалізації природного переходу від серцевини матеріалу до створеного на поверхні при його електрохімічному перетворенні міцному шарі з високими адгезією і зносостійкістю.

Як розвиток досліджених технологій запропонований також принципово новий метод, що полягає у з'єднанні у парі тертя алюмінієвої деталі, з утвореним корундовим шаром, з одного боку, і сталевій або чавунній деталі, обробленій методом дискретного зміцнення, – з іншого. Врешті утворюється унікальна

комбінація властивостей, розподілених і по поверхні контакту в межах однієї деталі, і за глибиною – в межах іншої, а також між контактуючими деталями. У результаті такого поєднання досягається досить продуктивний результат за усім комплексом триботехнічних характеристик досліджуваних пар деталей.

### **Наукові основи проектно-технологічного забезпечення технічних характеристик та методів зміцнення високонавантажених елементів машин**

При розробці принципово нових технологій, як зазначається у [1], однією з основних проблем є проблема пошуку оптимального рішення у нечітко визначеному та варійованому просторі чинників, за нечітких умов, обмежень та власне за невизначених характеристиках самого технологічного процесу. Це стосується також і в першу чергу науково-технічної проблеми розробки ефективних технологій поверхневого зміцнення високонавантажених елементів машин, що перебувають у рухомому контакті. Як відомо [1], традиційні технології вирішення цієї проблеми мають цілу низку принципових недоліків, серед яких – накопичення небажаних залишкових деформацій деталі або вузла та неефективне поєднання механічних характеристик матеріалу у поверхневому шарі та у глибині матеріалу, з якого виготовлено елемент, що зміцнюється. Важливо і те, що традиційні технології можуть поліпшуватися в основному тільки за рахунок компромісних, а не оптимізаційних процедур. Вихід із цієї ситуації – відмова від жорсткої регламентації чинників, пошук принципово нових фізико-механічних процесів та оптимізація їх впливу на комплекс критеріїв, що визначають характеристики поверхневого зміцнення елементів машин. Проте для реалізації цього підходу потрібно, по-перше, як зазначалося вище, розробити теоретичну основу, математичний апарат для багатоваріантного дослідження та оптимізації характеристик стану поверхневого шару у поєднанні із станом матеріалу на глибині, а, по-друге, власне провести із застосуванням розроблених підходів процес досліджень та синтезу схеми і параметрів нової

технології. Для цього потрібно розв'язати наступні нові наукові проблеми та прикладні задачі [1]:

1. Розробка нових теоретико-множинних підходів до генерації математичних, чисельних і фізичних моделей досліджуваних і створюваних технологій і станів зміцнюючих елементів машин, що характеризуються єдиним способом опису, пристосованістю до роботи з нечіткими, поповнювати і зменшуваними множинами факторів, а також інтегрованістю у сучасні методи наукового дослідження.

2. Реалізація розробленого підходу у комплексній математичній моделі дослідження напружено-деформованого стану (НДС) елементів машин, що знаходяться у стані контактної взаємодії.

3. Розробка спеціалізованого програмно-модельного комплексу для чисельних досліджень напружено-деформованого стану тіл складної форми та структури, які природним чином інтегруються у сучасні системи комп'ютерного моделювання.

4. Формування потужного програмно-апаратного комплексу, що володіє здатністю розв'язувати масштабні науково-технічні задачі, які виникають при багатоваріантних дослідженнях фізико-механічних систем із багатомільйонною кількістю невідомих.

5. Аналіз НДС елементів досліджуваних машин, поверхні яких оброблені за новою технологією зміцнення, яка пропонується в роботі, і розробка науково обґрунтованих рекомендацій із обґрунтування технологічних режимів запропонованого технологічного процесу.

Оскільки перелічені наукові проблеми є новими, актуальними і важливими для широкого класу задач, які на сьогодні стоять перед механікою, технологією машинобудування та машинознавством, то для їх вирішення були залучені передові теоретичні, комп'ютерно-інформаційні та апаратні розробки, системи і засоби. Самі наукові розробки, їх чисельна і програмно-апаратна реалізація здійснені у Національному технічному університеті «Харківський політехнічний інститут» протягом тривалого періоду, викладені у сотнях публікацій, висвітлені

на десятках конференцій, семінарів, симпозиумів. Нижче наведені авторські розробки в порядку переліку наукових проблем і прикладних завдань.

Теоретико-множинний підхід до генерування моделей фізико-механічних процесів і станів складних та надскладних механічних систем докладно викладений у роботі [1].

### **Аналіз напружено-деформованого стану зміцнених елементів машин**

Як відомо, проблема зміцнення поверхонь високонавантажених елементів машин військового та цивільного призначення традиційними поверхневими методами стикається із протиріччям між вартістю, енергоємністю, якістю. У роботі [1] описана принципово нова технологія дискретно-континуального зміцнення – ДКЗ – і показаний позитивний вплив цієї обробки на службові властивості сталевих і чавунних валів. Однак недослідженим залишився напружено-деформований стан виробу, хоча у результаті імпульсного нагріву, реактивного впливу плазми та її розширення у момент спаду струму в імпульсі у зоні розряду виникають термомеханічні напруження, а при контактній взаємодії вони доповнюються робочими напруженнями.

Основна теоретична база методу узагальненого параметричного моделювання складних і надскладних механічних систем, запропонована і реалізована в роботі у вигляді сучасного потужного програмно-апаратного комплексу, дає можливість здійснити розрахунок напружено-деформованого стану на прикладі фрагмента колінчастого валу двигуна, підданого ДКЗ.

### **Підходи до розв'язання поставленої задачі на прикладі колінчастого валу ДВЗ**

Зношування поверхонь тертя, як уже зазначалося, відбувається у результаті двох різновидів механічного зношування – абразивного і втомного. Тому довговічність і ресурс роботи колінчастих валів двигунів, в основному, визначаються двома параметрами – втомною міцністю виробу і зносостійкістю поверхні шийок. Якщо питання підвищення втомної міцності колінчастого вала

і взагалі всіх елементів трибосистем двигуна вирішується значною мірою на стадії їх проектування та призначення об'ємної термічної обробки, то зносостійкість деталей повністю залежить від методів зміцнення їх поверхневих елементів.

Загальним і найбільш істотним недоліком усіх традиційних методів поверхневого зміцнення є те, що вони зводяться лише до підвищення твердості матеріалу поверхневого шару деталі. Але, як відомо, одна твердість не може однозначно характеризувати зносостійкість. У результаті цього ресурс двигунів до відправки на капітальний ремонт у реальних умовах експлуатації виявляється істотно нижче нормативного.

Далі описані підходи, моделі та отримання чисельного результату напружено-деформованого стану фрагмента колінчастого вала, обробленого методом дискретного зміцнення.

Поставлена задача зводиться до необхідності здійснення багатоваріантних досліджень об'єкта складної форми з неоднорідними матеріалами при різних поєднаннях параметрів технологічного процесу. Проблема є актуальною для розробки загального методу опису розрахункових моделей складних і надскладних механічних систем, які враховують кількісні, якісні, структурні характеристики досліджуваних об'єктів. Її вирішення потребує значних обчислювальних ресурсів і нових підходів. Для цього використаний розроблений сучасний потужний програмно-апаратний комплекс для дослідження характеристик міцності і жорсткості елементів складних механічних систем. Рішення здійснено, слідуючи роботам [1, 14–16].

### ***Чисельний аналіз напружено-деформованого стану елементів валу після дискретного зміцнення***

На рис. 1 наведена схема розташування дискретних розрядів на опорній частині валу і виявлені при металографічних дослідженнях характерні ділянки структури у області розряду. Підшар складається із двох ділянок, що відрізняються складом легуючих елементів, перенесених із анода.

На рис. 2 показані прийняті при моделюванні позначення у дискретній зоні

зміцнення (ДКЗ):  $d$  і  $h$  – діаметр і глибина «білого» шару;  $H$  – загальна глибина підшару,  $b$  – ділянка підшару, зміцнений легуючими елементами;  $\tau_{xy}$  і  $\tau_z$  – крок в окружному і осьовому напрямках, відповідно.

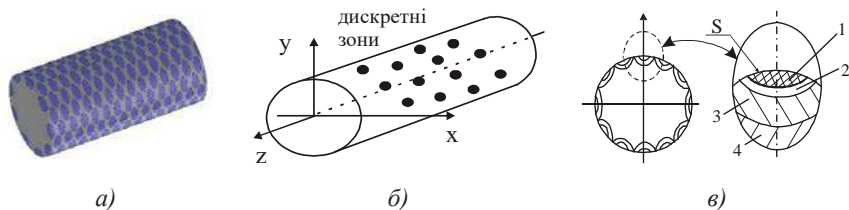


Рисунок 1. Фрагмент зміцненої частини опорної поверхні валу [1]

$a$  – геометрія показана умовно;  $b$  – схема розташування розрядів;  
 $v$  – характерні ділянки структури після ДКЗ: 1 – «білий» шар; 2, 3 – підшар;  
 4 – основний метал

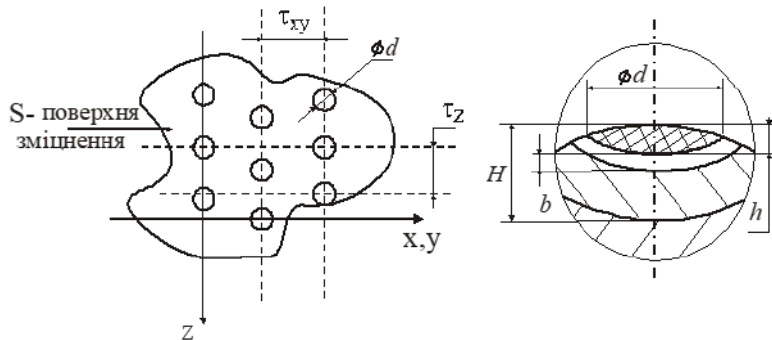


Рисунок 2. Прийняті при моделюванні позначення [1]

Щільність покриття поверхні  $S$  (коефіцієнт дискретності) визначається залежністю  $f = \pi d^2 / 4 \tau_{xy} \tau_z$ . Прийняті позначення властивостей:  $E$  – модуль пружності,  $\nu$  – коефіцієнт Пуассона;  $\sigma_{0,2}$  – умовна границя текучості;  $\sigma_b$  – межа міцності. Для різних ділянок властивості відмічаються індексом  $i$  ( $i = 1, 2, 3, 4$ ), який відповідає номеру ділянки на розрахунковій схемі (рис. 3). Таким чином, перелік

параметрів технологічного процесу ДКЗ –  $P = \{d, \tau_z, \tau_{xy}, E, \nu, \sigma_{0,2}, \sigma_b, h, b, H\}$  – це уся сукупність індексованих за номером ділянки властивостей матеріалу.

На першому етапі для отримання осесиметричної картини НДС у ДЗЗ була побудована скінченно-елементна модель зі згущенням вузлів у зоні дискретного зміцнення (рис. 4).

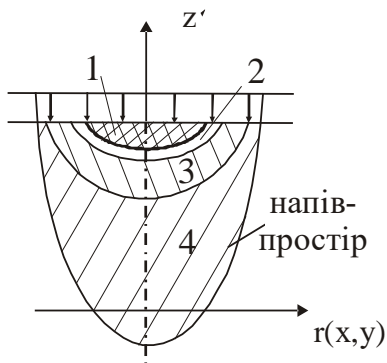


Рисунок 3. Розрахункова схема для визначення НДС у ДЗЗ

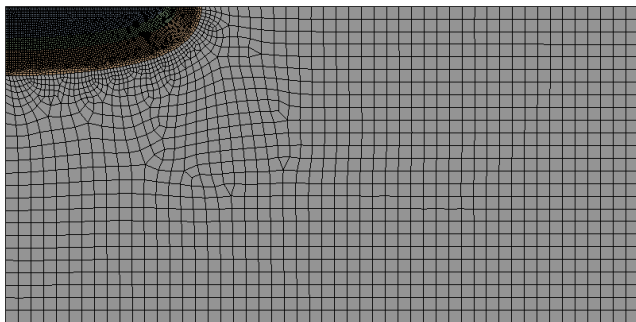


Рисунок 4. Скінченно-елементна модель

Якісні картини компонент НДС при співвідношенні модулів пружності  $\alpha_1 = E_1/E_4 = 1,2$ ;  $\alpha_2 = E_2/E_4 = 1,1$ ;  $\alpha_3 = E_3/E_4 = 1,0$ ;  $\beta_1 = \nu_1/\nu_4 = 1,0$ ;  $\beta_2 = \nu_2/\nu_4 = 1,0$ ;  $\beta_3 = \nu_3/\nu_4 = 1,0$  наведені на рис. 5. Видно, що профіль деформованої поверхні сприятливий для роботи у процесі контактної взаємодії,

оскільки при цьому контактний тиск перерозподіляється, збільшуючись в області легованого матеріалу та зменшуючись при віддаленні від нього. Таким чином, після ДКЗ не тільки досягається зміцнення, але й поліпшуються умови тертя (в силу більш низького коефіцієнта тертя матеріалу 1 по спряженій деталі, див. рис. 3).

Такий ефект тут названий « $\Delta$ -ефект». Чим більший тиск, тим більше деформується тіло деталі, тим більший ефект перерозподілу зусиль контактної взаємодії у бік найбільш міцної ділянки спряження. Отже, при зміні контактного тиску ефект є стабільним.

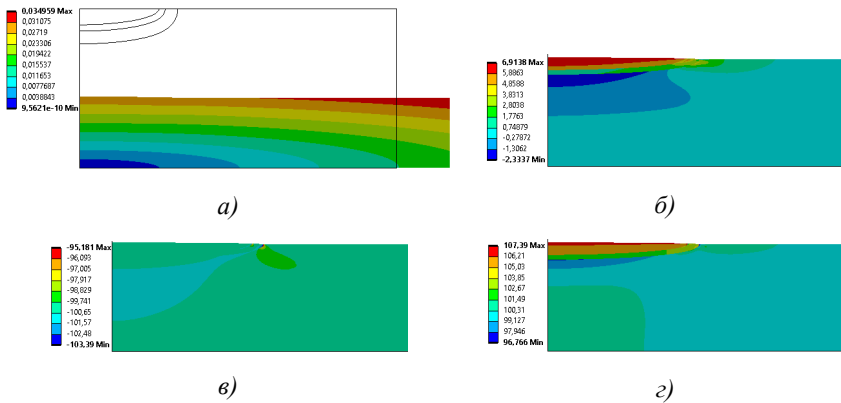
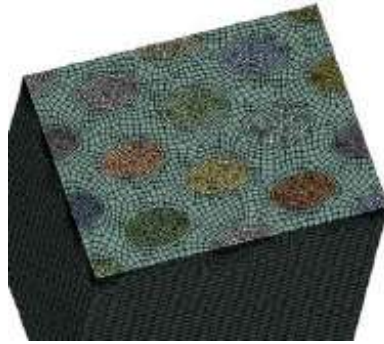


Рисунок 5. Компоненти НДС в області ДЗЗ

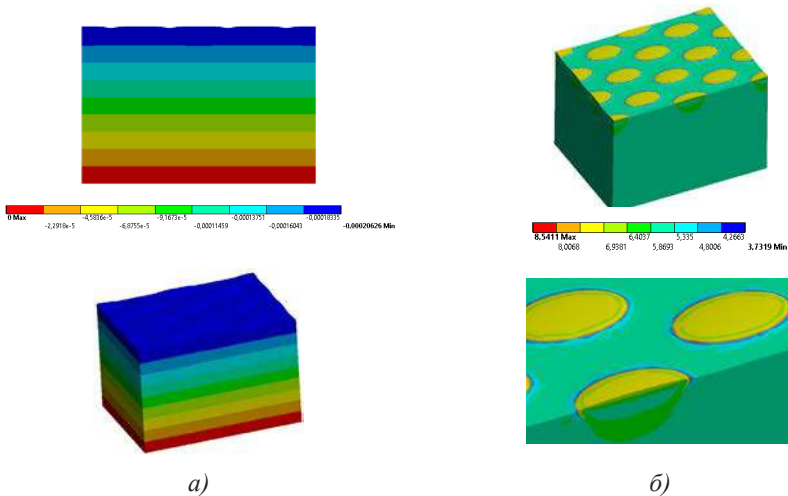
*а – вертикальні переміщення; б – перші головні напруження; в – треті головні напруження; г – інтенсивність напружень за Мізесом*

Для аналізу впливу різних чинників на НДС реальних конструкцій, що піддані дискретно-континуальному зміцненню, побудовано просторову скінченно-елементну модель (СЕМ) фрагменту приповерхневої частини опорної частини валу після ДКЗ. Оскільки для повного моделювання опорної частини валу потрібна надто велика (сотні мільйонів ступенів вільності) СЕМ, то було визначено репрезентативну множину (частину деталі), що входить до складу відповідного секторного вирізу (рис. 6).



*Рисунок 6. СЕМ під поверхневого шару опорної частини валу*

На рис. 7, 8 наведена типова картина НДС та розподілу вертикальних переміщень вздовж відрізка прямої, що проходить через центри ДЗЗ. Видно, що спостерігається та ж картина переміщень, що й у випадку одиничних ДЗЗ, але з періодом повторення, який дорівнює кроку розміщення ДЗЗ.



*а)*

*б)*

*Рисунок 7. Картина переміщень і напружень у приповерхневому шарі деталі  
а – деформований стан; б – напружений стан*

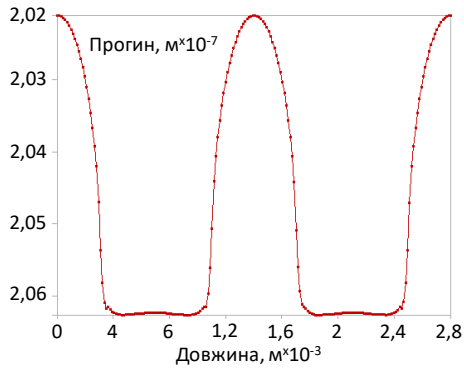


Рисунок 8. Картина переміщень точок поверхні деталі

Як видно із порівняльного аналізу одержаних розподілів компонентів НДС на рис. 4–9, збільшення відносної жорсткості матеріалу зміцнення сприяє підсиленню позитивного впливу виявленого  $\Delta$ -ефекту зміцнення та збільшення стійкості поверхні  $S$  до зношування. Що стосується впливу параметру  $f$  щільності покриття поверхні  $S$  (див. вище), то в області його оптимальних значень 0,55–0,75  $\Delta$ -ефект – найбільш дієвий.

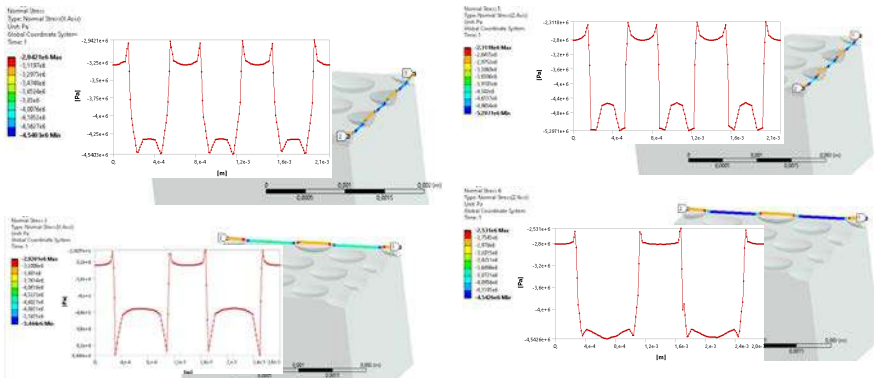


Рисунок 9. Картини розподілу нормальних напружень у поверхневому шарі деталі

Як показав аналіз напруженого стану опорної частини валу, крім виявленого  $\Delta$ -ефекту, значення має ще й інший ефект, названий тут « $\sigma$ -ефектом». Він полягає в тому, що при сумісному деформуванні розплавленого матеріалу ДЗЗ створюється залишковий напружений стан, який при суперпозиції з напруженим станом від дії тиску  $p$  дає ефект зменшення рівня результуючих напружень. Аналіз показує, що найбільший « $\sigma$ -ефект» також досягається у діапазоні  $f$  0,55–0,75.

Крім того, були здійснені чисельні дослідження контактної взаємодії зміцнених деталей. Це викликано тим, що на сьогодні відсутній достатньо докладний аналіз особливостей, привнесених на мікрорівні, у процес контактної взаємодії дискретно зміцнених деталей. Це актуальне завдання частково вирішено і описано у цій роботі.

Як досліджуваний об'єкт був розглянутий фрагмент двох контактуючих пружних тіл, одне з яких містить напівовальну зону включення із розмірами 0,6x0,6x0,4 мм. Це і є зона дискретного зміцнення. Вона складається з високолегованого матеріалу (сталь 12X18H10T), а основний матеріал – чавун ТУ Д70.05.ДТ: 1978. У досліджуваній системі вичленований окремих фрагмент (рис. 10).

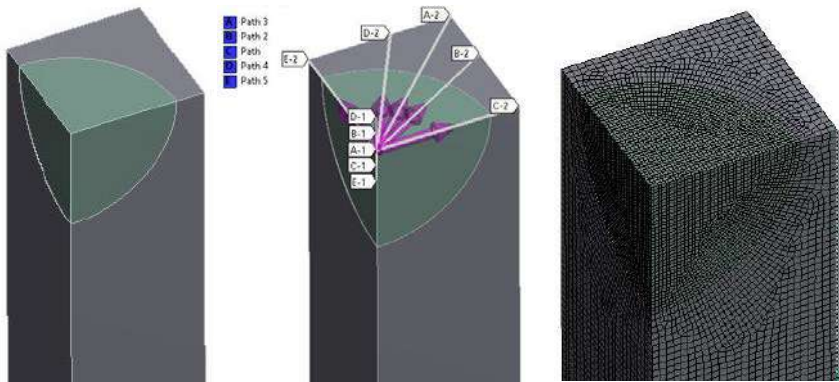


Рисунок 10. Розрахункові схеми для задачі аналізу НДС фрагмента деталі із зоною дискретного зміцнення при дії на поверхню розподіленого тиску  $p=100$  МПа

За розмірами у плані він відповідає  $\frac{1}{4}$  елементарної ґратки, якою вимощена поверхня дискретно зміцненої деталі. За глибиною фрагмент обмежений 10-ма розмірами характерного розміру у плані. По бічних поверхнях фрагмента задані умови симетрії, нижня грань закріплена, верхня – навантажена рівномірно розподіленим тиском  $p = 100$  МПа, а по зв'язаних сторонах моделюються умови контактної взаємодії без тертя.

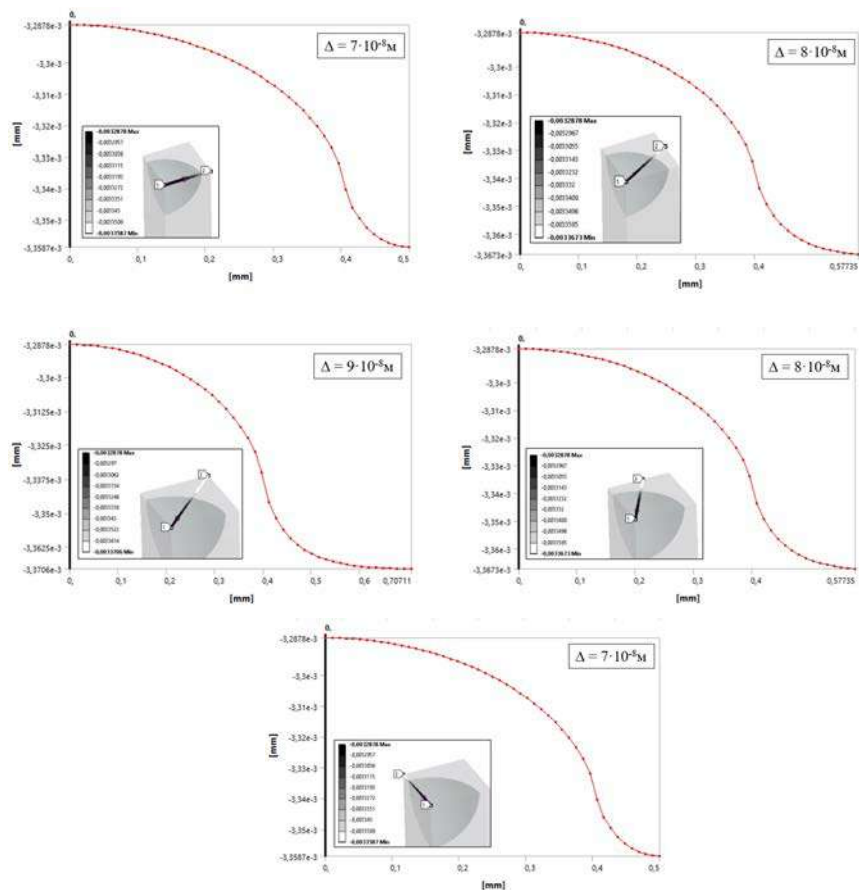


Рисунок 11. Розподіл профілів деформованої поверхні уздовж шляхів 1–5 (див. рис. 10)

На рис. 11–13 наведені картини розподілу компонент напружено-деформованого стану у дослідженому фрагменті системи взаємодіючих тіл, одне з яких містить зону дискретного зміцнення. Представлені картини розподілу контактного тиску свідчать про суттєву його нерівномірність. При цьому велика частина діючого навантаження притискання тіл, що припадає на окремо взятий фрагмент і містить одну зону дискретно-зміцненого матеріалу, передається через цю зону. В області контакту незміцненого матеріалу із незміцненим матеріалом іншої деталі контактний тиск набагато нижчий. Відповідно, у цій області – більш сприятливі умови для акумулювання мастильного матеріалу, циркулюючого у лабіринті між зонами дискретного зміцнення.

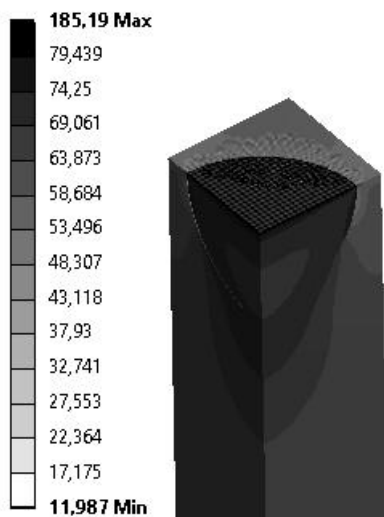


Рисунок 12. Розподіл еквівалентних напружень за Мізесом

Беручи до уваги, що поверхня зони дискретного зміцнення має низький коефіцієнт тертя у спряженні із поверхнею основного матеріалу, отримуємо у підсумку вигравш за інтегральним значенням зусиль тертя. Крім того, за рахунок більш високих механічних властивостей легованого матеріалу зони дискретного зміцнення (порівняно із властивостями основного матеріалу) деяке

збільшення діючих у ній напружень (порівняно з випадком відсутності зон дискретного зміцнення) нівелюється з точки зору міцності.

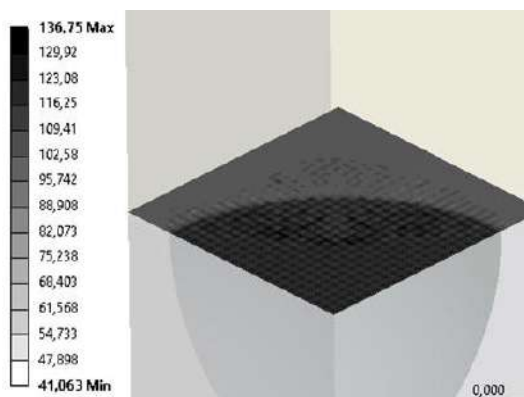


Рисунок 13. Розподіл контактної тиску

На додаток можна відзначити також, що верхній шар матеріалу зон дискретного зміцнення, що містить значні залишкові напруження після технологічної операції дискретного зміцнення, видаляється шляхом шліфування. Це означає, що у результаті знижується рівень сумарних напружень (від зовнішніх зусиль і від залишкового напруженого стану). Все це сприяє поліпшенню і трибологічних, і міцнісних характеристик.

Описані результати чисельних досліджень дають підстави зробити наступні висновки:

1. Розроблені комплексні скінченно-елементні моделі характеризуються адаптованістю до аналізу та синтезу принципово нових способів зміцнення елементів високонавантажених елементів машинобудівних конструкцій, що якісно відрізняє їх від побудованих традиційними способами.

2. Здійснені числові дослідження дали можливість виявити два ефекти, названі « $\Delta$ -ефект» та « $\sigma$ -ефект». Перший із них полягає у позитивному характері зміни деформованого профілю у контакті зміцнюваного елемента машини зі спряженими елементами. Другий ефект полягає у створенні сприятливого залишкового напруженого стану після зміцнення досліджуваного об'єкту із

застосуванням нової дискретно-континуальної технології. Після накладення на розподіл робочих напружень створюється результуючий напружений стан, значно віддалений від небезпечного рівня, порівняно із незміщеними деталями машин.

3. На рівні мікроструктури встановлено, що контактна взаємодія здійснюється по всій площі спряження деталей, однак нормальні зусилля передаються в основному через зони дискретного зміцнення. Внаслідок взаємного руху контактуючих деталей в зоні їх спряження виникають зусилля тертя, які розподіляються у цій зоні нерівномірно. У свою чергу, нерівномірним буде і зношування.

Перелічені чинники створюють позитивні тенденції у всьому комплексі трибомеханічних характеристик у зоні взаємодії зміцнених деталей.

### **Комбіновані технології підвищення зносостійкості високонавантажених пар тертя**

Високонавантажені пари тертя, як було продемонстровано в ході попередніх досліджень авторів роботи [1], можуть бути оброблені за допомогою різних технологій зміцнення. У той же час становить інтерес, як з точки зору науки, так – і практики, розвиток запропонованих способів зміцнення. Вони можуть удосконалюватися як кожен окремо, так і шляхом поєднання. При цьому слід очікувати ефекту більш відчутного, ніж від сумарного впливу кожного із способів. Далі на прикладі деталей кривошипно-шатунного механізму ДВЗ описується один із способів комбінованого їх зміцнення, а саме – комбінація корундування поверхні однієї деталі із одночасним дискретним зміцненням поверхні спряженої деталі. Незважаючи на таке частинне застосування, його можна розглядати як ілюстрацію загальних тенденцій при застосуванні такого типу технологій для контактуючих із тертям деталей широкого класу машинобудівних конструкцій.

Як уже зазначалося вище, двигунобудування є однією з найбільш пріоритетних галузей промисловості будь-якої високорозвиненої країни. Сучасні

двигуни містять у собі передові досягнення практично всіх галузей науки і техніки. Високі вимоги до показників надійності, економічності, технологічності та екологічності вимагають впровадження сучасних технологій при їх виробництві починаючи від структури металу заготовок деталей, точності їх виготовлення і закінчуючи удосконаленням фізико-хімічних процесів згоряння різних видів палив. У найбільш важких умовах експлуатуються, зокрема, двигуни військових машин. Часті зміни режимів роботи, тривалі періоди роботи на холостому ходу, швидкі набори потужності від малих навантажень до максимальних і навпаки, – все це призводить до підвищеного зношування високонавантажених пар тертя, що істотно знижує надійність роботи двигуна у цілому [17]. Питанням підвищення зносостійкості пар тертя присвячено багато досліджень, у яких детально розглянуто причини збільшеного зношування, виникнення задирів і надані рекомендації з підвищення задиростійкості високонавантажених пар тертя [18, 19]. Найпростішим, але витратним способом підвищення зносостійкості пар тертя є застосування дорогих високолегованих сталей при їх виготовленні, але це призводить до істотного збільшення вартості двигуна і знижує його конкурентоспроможність на ринку. Крім того, проблеми підвищення зносостійкості супроводжуються також проблемами забезпечення довговічності роботи відповідальних деталей двигунів за критерієм втомного руйнування, контактної міцності через інтенсивні контактні навантаження в зонах сполучення деталей двигунів (наприклад, вал – втулка або поршень – гільза циліндра), забезпечення прийнятного рівня ККД, який лімітується втратами на тертя тощо. Таким чином, згадувана проблема носить не вузький, а широкий, комплексний характер. При цьому її вирішення має здійснюватися не за одним, а за декількома напрямками.

При експлуатації двигунів спостерігаються три стадії зношування. До першої стадії відноситься зношування поверхонь тертя сполучених деталей при припрацюванні двигуна. Зазвичай цей період двигуни проходять у заводських умовах за спеціальними програмами заводських здавальних випробувань. У цей період відбувається згладжування мікрощорсткості робочих поверхонь деталей,

і в подальшому інтенсивність їх зношування різко зменшується. Друга стадія зношування при правильній експлуатації двигуна носить природний характер. Її період визначається якістю виготовлення деталей, а період оглядів і ремонтів визначений нормативно-технічною документацією заводу-виробника. При подальшій експлуатації високонавантажені пари тертя двигуна переходять у період інтенсивного зношування, який при досягненні граничних величин переходить до аварійних режимів експлуатації [20]. Найбільш навантаженими є деталі кривошипно-шатунного механізму двигуна. Вони визначають надійність роботи і його ресурс.

Фахівцями Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут" та ДП «Завод ім. В.О. Малишева» розроблені технології, що дають можливість при мінімальних енергетичних витратах забезпечити високу зносостійкість робочих поверхонь високонавантажених пар.

Однією з основних причин виходу з ладу двигунів є зношування і, внаслідок цього, збільшення зазорів у парі колінчастий вал – вкладиш підшипника ковзання. Це, у свою чергу, призводить до зниження тиску мастила і, у міру збільшення зазору, – до зростання динамічних навантажень, які поступово набувають ударного характеру. У результаті істотно підвищується зношування поршневих пальців, верхніх головок шатуна, поршня тощо. Нерівномірне зношування корінних і шатунних шийок колінчастого валу за його довжиною призводить до утворення завищеної ступінчастості між суміжними шийками, що призводить до збільшення згинних навантажень на колінчастий вал і може бути причиною його поломки.

Метою дослідження є обґрунтування, дослідження і доведення при виробництві розроблених енергозберігаючих технологій зміцнення при виготовленні і ремонті високонавантажених деталей двигунів машин військового і цивільного призначення на базі технологій дискретного та дискретно-континуального зміцнення для пар тертя поршень-гільза і шийка колінчастого валу – підшипник ковзання.

Відповідно до поставленої мети поставлені і вирішені наступні завдання: чисельне дослідження і первинний аналіз процесів контактної взаємодії зміцнених деталей двигунів, тертя і зношування у їх сполученні, а також розробка рекомендацій щодо обґрунтування технологічних режимів обробки поверхневих шарів деталей із метою підвищення трибомеханічних характеристик високонавантажених відповідальних деталей двигуна; здійснення випробувань зразків, виготовлених із матеріалу поршня, вкладиша і колінчастого валу, які були виготовлені із застосуванням розроблених технологій; експериментальна оцінка підвищення зносостійкості досліджуваних зразків; розробка на основі результатів здійснених досліджень рекомендацій щодо застосування технологій дискретного зміцнення і гальвано-плазмового перетворення високонавантажених пар тертя для подальшого застосування у виробництві двигунів, як альтернативних найбільш поширеним стандартним технологіям нормалізації, загартування СВЧ, азотування тощо.

Розв'язання поставлених завдань дасть можливість суттєво збільшити міжремонтні терміни експлуатації двигунів, а також створити надійні триботехнічні системи, які дають можливість виготовляти вузли тертя, що працюють до списання двигуна.

Технології дискретного зміцнення чавунних і гальвано-плазмового перетворення алюмінієвих високонавантажених деталей, що труться, при істотному підвищенні твердості приповерхневого шару не впливають на пластичність серцевини. Суть технології дискретного зміцнення чавунних деталей полягає в тому, що на їх поверхню електроіскровим способом з електрода, виконаного з легуючого матеріалу, на катод (поверхня деталі) переносяться легуючі частинки у вигляді острівців або ліній всілякої конфігурації, які при попаданні на поверхню швидко остигають, що призводить до появи каверн (поглиблень) [21, 22]. Надалі при шліфуванні деталі наявні макро- і мікродефекти видаляються, що виключає можливість появи концентраторів напружень і поліпшує якість поверхні.

Раніше здійснені експериментальні дослідження [1] показали, що дискретне зміцнення зразків, виконаних із високоміцного чавуну забезпечує підвищення їх зносостійкості у 6–10 разів порівняно зі стандартною технологією нормалізації і в 1,3–1,5 рази – порівняно з технологією гартування ТВЧ, а сталевих зразків – у 1,6–3,5 рази порівняно із азотуванням. Одночасно як у чавунного, так і сталевих зразків поліпшуються припрацювальні характеристики поверхонь, підвищується зносостійкість, знижується коефіцієнт тертя [23–25].

Технологія континуального зміцнення, викладена у [26–29], дає змогу обробити значні поверхні деталей машин та досягти певного ефекту.

### ***Чисельні дослідження***

На теперішній час відсутні дослідження контактної-фрикційної взаємодії у сполученнях, що містять, з одного боку, деталі, оброблені за технологією дискретного зміцнення, а з іншого, – оброблені за технологією гальвано-плазмового перетворення поверхні ("корундування"). Це призводить до необхідності розв'язання декількох нових актуальних і важливих завдань. Зокрема, це – чисельне дослідження НДС у зоні контактного сполучення таких деталей, аналіз зношування і втрат на тертя. Наступний етап досліджень – експериментальні дослідження на лабораторних зразках. Нижче наведені результати таких досліджень.

При чисельному дослідженні НДС одержуваної системи деталей, оброблених методами дискретного зміцнення і корундування, використовувався підхід і математична модель, розроблені раніше [1]. На цій основі для механічної системи, представленої на рис. 14, розроблена скінченно-елементна модель, яка містить представницький об'єм (рис. 15). Цей об'єм (комірка) дає можливість на мікрорівні промодельовати напружено-деформований стан взаємодіючих тіл, розподіл контактної тиску, оцінити тертя і зношування у сполученні деталей, перевівши дослідження на реальний макромасштаб.

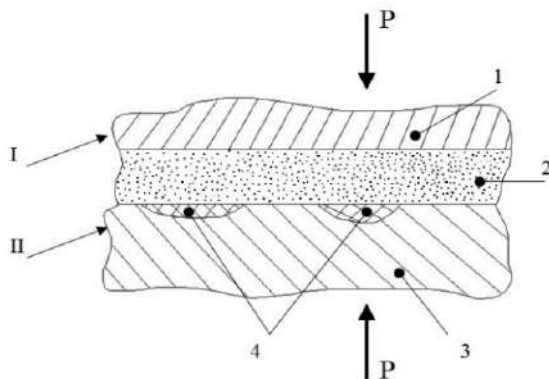


Рисунок 14. Схема контактної взаємодії деталей

- I – деталь зі сплаву АК4 (1), зміцнена шляхом гальвано-плазмового перетворення поверхні зі створенням корундового шару (2);  
 II – деталь (основний матеріал – сталь, чавун (3)), оброблена методом дискретного зміцнення (ДЗЗ – дискретно-зміцнена зона (4))

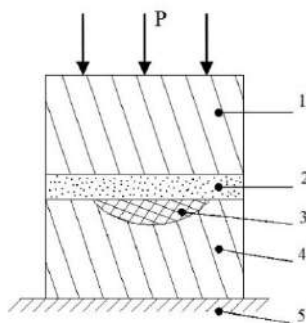


Рисунок 15. Схема моделі представницької ґратки механічної системи

- 1 – АК4; 2 – шар  $Al_2O_3$ ; 3 – ДЗЗ; 4 – основний матеріал;  
 5 – основа (жорстка основа)

При задаванні механічних властивостей корундового шару враховувався вплив двох факторів: мікрогеометрія виступів-западин на поверхні шару і його пористість. Залежно від режимів технологічного процесу ці величини можуть змінюватися у досить широких межах. Для розрахункових досліджень використовуваним

матеріалам присвоїли модулі пружності  $E_2 = 3,45 \cdot 10^{11}$  Па, інші матеріали мали властивості (Al)  $E_1 = 7 \cdot 10^{10}$  Па,  $E_3 = 2,1 \cdot 10^{11}$  Па (високолегована сталь),  $E_4 = 1,1 \cdot 10^{11}$  Па (чавун), жорстка основа – моделювалася як жорстке закріплення.

На рис. 16 наведені геометрична і скінченно-елементна моделі представницької ґратки механічної системи, а також геометрична модель з доданими зовнішніми навантаженнями.

При цьому на вертикальні стінки моделі накладалися умови симетрії таким чином, щоб геометрична модель була деякою внутрішньою частиною загальної моделі. Скінченно-елементна модель побудована переважно із гексагональних елементів. Прикладається навантаження 100 МПа.

За підсумками розрахунків визначалися поля розподілу компонент напружено-деформованого стану. На рис. 17 наведені розподіли максимальних еквівалентних напружень для елементів системи.

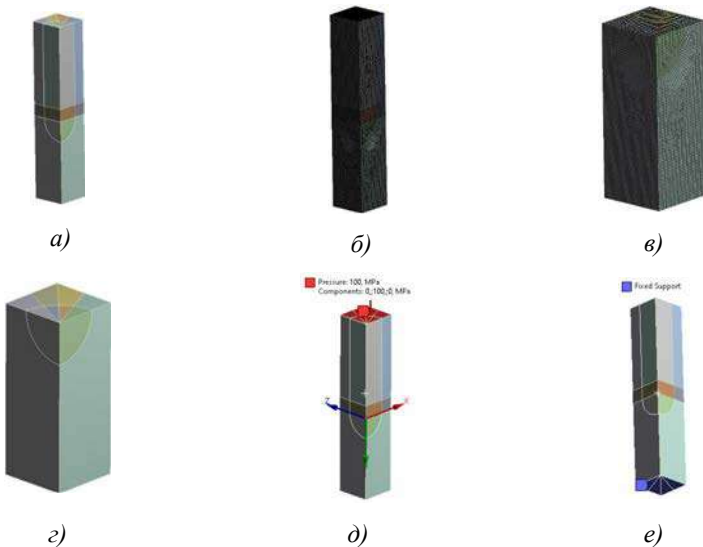


Рисунок 16. Геометрична і скінченно-елементна моделі, зовнішні навантаження: тиск, що прикладається, і закріплення  
*a* – повна геометрична модель; *б* – скінченно-елементна модель (СЕМ); *в* – СЕМ нижньої частини (ДЗЗ і основний матеріал); *г* – нижня частина моделі (ДЗЗ і основний матеріал); *д* – тиск, що прикладається; *е* – умова закріплення

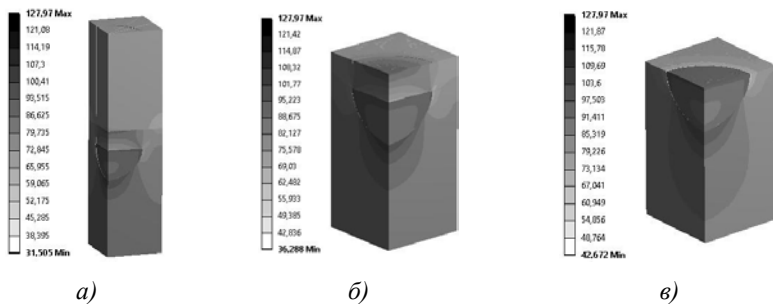


Рисунок 17. Максимальні еквівалентні напруження за Мізесом  
*а – максимальні еквівалентні напруження в усій моделі»; б – максимальні еквівалентні напруження (шар  $Al_2O_3$ , ДЗЗ, основний матеріал);*  
*в – максимальні еквівалентні напруження (шар  $Al_2O_3$ , ДКЗ, основний матеріал)*

На рис. 18 наведений розподіл контактної тиску у області контактної взаємодії елементів системи, що розглядається. Також за результатами здійснених розрахунків були визначені переміщення уздовж осьової координати по шляху, який проходив через діагональ моделі. На рис. 19 наведені шлях і переміщення (уздовж вертикальної осі відкладені значення переміщень у м, а уздовж горизонтальної – довжина шляху, тобто довжина уздовж діагоналі моделі, у м).

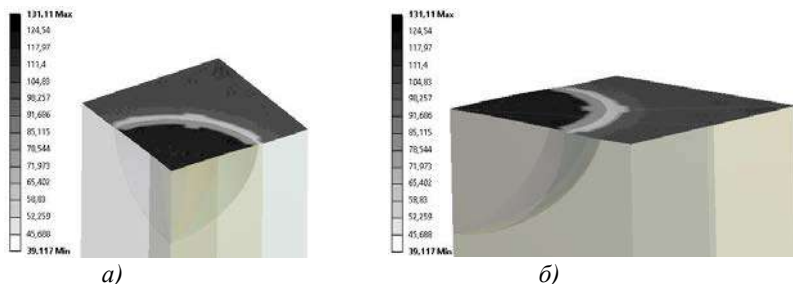
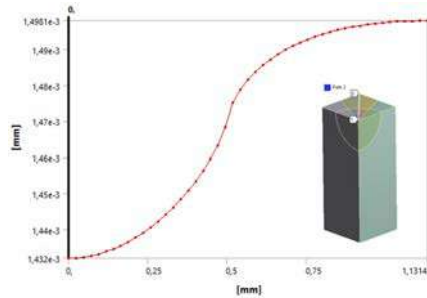


Рисунок 18. Розподіл контактної тиску, Па  
*а – контактний тиск; б – контактний тиск (в масштабі, з 1500 кратним збільшенням ступеня деформування)*



а)



б)

Рисунок 19. Шлях для визначення переміщень і графік розподілу переміщень уздовж осьової координати за шляхом

а – шлях для визначення переміщень; б – графік переміщень (уздовж вертикальної осі відкладені значення переміщень ( $m$ )), уздовж горизонтальної – довжина шляху (довжина уздовж діагонали моделі), ( $m$ ))

З аналізу наведених даних видно, що в області ДЗЗ (див. рис. 14) спостерігається більш високий рівень контактного тиску, ніж в області контактування з основним матеріалом деталі II. Відповідно, якщо в парі «корундовий шар-сталь» коефіцієнт тертя нижче, ніж у парі «корундовий шар-основний матеріал деталі II», то при їх взаємному русі виникає два ефекти.

Перший пов'язаний із зменшенням сумарної величини тертя у сполученні деталей I і II (оціночно – у 1,2–1,8 рази). Другий визначає зниження зношування, що пояснюється більш низькою інтенсивністю зношування високолегованої сталі порівняно з чавуном.

Ще однією важливою обставиною є механізм забезпечення сталого сприятливого комплексного ефекту від взаємодії факторів «розподіл контактного тиску–тертя–зношування». У традиційних технологіях така лінійна послідовність факторів знаходиться у «позитивному» зворотному зв'язку: наявність значних контактних тисків у сполученні взаємно рухомих деталей призводить до дотичних сил тертя, які викликають зношування; при зношуванні, як зазначалося вище, зростають навантаження, що, у свою чергу, призводить до зростання контактного

тиску. У результаті отримуємо циклічно прогресуючий процес уздовж «спіралі»  $P$  (рис. 20, *а*), який віддаляється від номінального (початкового циклу) в процесі експлуатації. На протидію цій тенденції для запропонованої технології реалізується інша, конкуруюча тенденція (див. рис. 20, *б*).

У цьому випадку дія зусиль тертя викликає зростання зношування основного матеріалу 4 (див. рис. 15) порівняно зі зношуванням матеріалу ДЗЗ 3. При цьому матеріал корундового шару 2 при досягненні припрацювальної границі у подальшому зношується слабо. У цих умовах відбувається перерозподіл контактної сили переважно на область ДЗЗ, загальна сила тертя зростає повільніше, сила тертя у зоні сполучення із основним матеріалом зменшується, що призводить до зменшення його зношування. Таким чином, реалізується сценарій «негативного» зворотного зв'язку, і розвиток процесів йде за лінією  $S$  (див. рис. 20), яка віддаляється від лінії  $N$  повільніше, ніж  $P$ . За певних умов це може призводити до перетворення  $S$  у практично стабільне коло, що означає реалізацію сталих процесів «контактна взаємодія–тертя–зношування» (див. рис. 20).

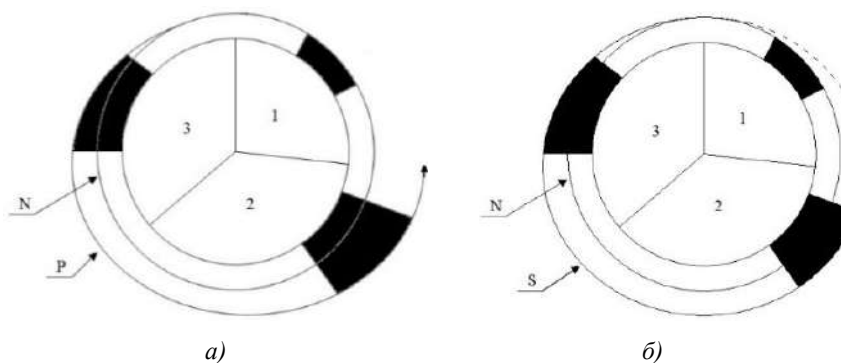


Рисунок 20. Механізми розвитку процесів контактної взаємодії (КВ), тертя (Т) і зношування (З)

*а* – традиційні технології; *б* – запропонована технологія;

1 – контактна взаємодія; 2 –зношування; 3 –тертя

Природно, що у реальних умовах дійсні процеси поєднують тенденції *a* і *b* (див. рис. 20). Однак важливий сам механізм стабілізації *B*, оскільки він характеризує тенденцію до сталого самоповторення досліджуваних процесів, а не до їх інтенсифікації (що характерно для традиційних процесів обробки поверхневих шарів матеріалів двигунів ДВЗ).

Первинні оцінки матеріалів отриманих результатів дають рекомендації щодо вибору параметрів технологічного процесу: відносна площа ДЗЗ – 65–75 %, товщина корундового шару – 0,03–0,3 мм; пористість – 10–20 %.

### ***Експериментальні дослідження***

Для здійснення випробувань на зносостійкість при терті ковзання в умовах граничного змащення і змащення з абразивом були виготовлені дослідні зразки з матеріалів «колодка» – вкладиша і «диск» – колінчастого валу. «Диск» був виготовлений з високоміцного чавуну з кулястим графітом, поверхня якого була зміцнена методом електроіскрового зміцнення з подальшим шліфуванням до шорсткості, що відповідає  $R_a = 0,63 - 0,32$  мкм. «Колодка» виготовлялася зі сталелегуючої смуги з алюмінієвою поверхнею АМ01-20, яка була модифікована гальвано-плазмовим методом на глибину порядку 0,03–0,3 мм. Поверхня «колодки» шліфуванню не піддавалася. Режим випробувань моделювали умови роботи шатунно-поршневої групи двигуна. Випробування проводилися на машині тертя 2070 СМТ-1 при швидкості ковзання 1,3 м/с. Використані стандартні зразки: «диск» діаметром 50 мм, ширина 12 мм; «колодка» з площею робочої поверхні  $2 \cdot 10^{-4}$  м<sup>2</sup>. Схема випробувань наведена на рис. 21.

У результаті випробувань також визначався коефіцієнт тертя ( $f_{TP}$ ) і було встановлено, що, незважаючи на підвищену твердість «колодки», при введенні диспергованої добавки оксидів магнію в модифікований приповерхневий шар вкладиша з АМ01-20 відбувається зниження коефіцієнта тертя при граничному змащенні у всьому дослідженому діапазоні навантажень, що може бути пов'язане

із поліпшенням процесів мікроприпрацювання робочої поверхні валу з утворенням на його поверхні аморфованого шару [29].

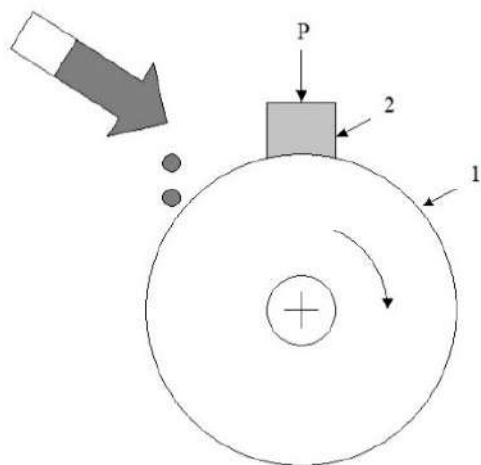


Рисунок 21. Схема випробувань на машині тертя 2070 СМТ-1:

1 – рухомий зразок «диск», 2 – нерухомий зразок «колодка»

**Аналіз отриманих результатів** випробувань (табл. 1) дає підставу для твердження про можливу зміну характеру припрацювальних процесів у результаті істотної зміни властивостей приповерхневого шару досліджуваних зразків вкладишів. Як відомо [25], припрацювання сталелегуючих вкладишів полягає в перенесенні м'якої структурної складової антифрикційного сплаву (олова) на спряжену поверхню валу, що фактично не виправляє його макрогеометрії у процесі припрацювання.

За наявності на робочій поверхні вкладиша такого корундового шару, утвореного в результаті гальвано-плазмової обробки, у процесі припрацювання сполучення «колінвал – вкладиш» насамперед виправляється макрогеометрія робочої поверхні колінчастого валу.

Таблиця 1. Результати випробувань з визначення вагового зношування

Матеріал і покриття «колодки»	Зношування «колодки», см $10^{-4}$	Зношування «диска», см $10^{-4}$
АМО1-20	7,5 (2,5 мкм/год)	0,07 (0,023 мкм/год)
АМО1-20 + МДО	3,4 (1,1 мкм/год)	0,20 (0,07 мкм/год)

При цьому також відбувається полірування і процеси мікроприпрацювання з утворенням аморфізованих приповерхневих робочих шарів, що забезпечують високі антифрикційні характеристики сполучення. Наявність тонкого оксидно-корундового шару на робочій поверхні вкладиша у процесі припрацювання за рахунок зниженої теплопровідності корундового шару дає можливість зменшення відносно великих зазорів на мастило, прийнятих при установці вкладиша колінчастого вала з антифрикційним шаром із алюмінієвого сплаву [30, 31]. Зменшення величини гарантованого зазору підвищує тиск у системі змащення дизеля, знижує втрати на тертя, температуру головки поршня, шум при роботі дизеля, також сприяє збільшенню ресурсу вузла "колінчастий вал – вкладиш" і «поршень – гільза» до капітального ремонту.

Як висновки можна визначити наступне. Чисельне моделювання процесів контактної взаємодії, тертя і зношування продемонструвало наявність механізму їх стабілізації у системі сполучених деталей, оброблених методами дискретного зміцнення і корундування. Застосування пари тертя – сталєалюмінієві вкладиші з АМО1-20 з корундовим шаром і колінчастий вал, виготовлений з високоміцного чавуну із кулястим графітом, поверхні корінних і шатунних шийок якого зміцнені методом дискретного зміцнення, – істотно підвищують стійкість пари до задируутворення. При утворенні на робочій поверхні вкладиша такого корундового шару, твердість якого істотно перевищує твердість поверхні шийок колінчастого вала, в процесі припрацювання сполучення «колінчастий вал–вкладиш» насамперед виправляється макрогеометрія робочої поверхні шийок колінчастого вала. Введення диспергованої добавки оксиду магнію у модифікований приповерхневий шар вкладиша АМО1-20 призводить до

зниження коефіцієнта тертя при граничному змащенні у всьому дослідженому діапазоні навантажень, що може бути пов'язане з поліпшенням процесів мікроприпрацювання робочої поверхні шийок колінчастого вала з утворенням на їх поверхні аморфізованих шарів.

Результати здійснених чисельних досліджень та експериментальних випробувань свідчать про доцільність застосування гальвано-плазмової обробки сталеалюмінієвих вкладишів у парі з чавунним колінчастим валом, шийки якого зміцнені методом дискретного зміцнення. Застосування досліджених методів модифікування робочої поверхні вкладиша і зміцнення шийок колінчастого вала може дати можливість знизити відносно високі зазори на змащування, прийняті при установці сталеалюмінієвих вкладишів. У результаті запропонована комбінована технологія продемонструвала високі потенційні можливості для підвищення трибомеханічних характеристик високонавантажених контактуючих деталей тертя машин військового та цивільного призначення.

## **ВИСНОВКИ**

На основі здійснених фундаментальних і прикладних досліджень вперше науково обґрунтована та експериментально підтверджена можливість підвищення міцності, твердості, зносостійкості та довговічності високонавантажених деталей двигунів і агрегатів військової та цивільної техніки методами дискретного та дискретно-континуального зміцнення деталей. Це є базою при проектно-технологічному забезпеченні тактико-технічних і технічних характеристик військових та цивільних машин вітчизняного виробництва.

Ці методи забезпечують більш високий, порівняно з відомими способами зміцнення, рівень зносостійкості і міцності з одночасним підвищенням задиристійкості та зниженням зношування.

Запропоновані технології здійснюють мінімальний вплив на навколишнє середовище. При цьому в 5...8 разів зменшується час і вартість технологічних операцій із дискретного зміцнення. Границя між зміцненим шаром і основним

металом не є технологічним концентратором напружень і не знижує втомну міцність деталі. Забезпечується підвищення загальної і контактної міцності, збільшення ресурсу і зменшення втрат енергії в машинах та їх елементах мінімум на 40 %.

Створені рекомендації щодо серійного виробництва, модернізації та реконструкції серії двигунів, а також агрегатів військової та цивільної техніки: танкові трансмісії, автомобільні двигуни для військової техніки, стволи танкових гармат, тепловозні двигуни, агрегати автономного живлення для стратегічних об'єктів тощо. Завдяки застосуванню нових проектно-технологічних рішень забезпечені високі технічні та тактико-технічні характеристики бойових броньованих машин, установок для автономного енергопостачання стратегічних об'єктів, військових автомобілів, магістральних тепловозів 2ТЕ10 та 2ТЕ116 та інших машин військового та цивільного призначення.

Впровадження результатів здійснених дослідних робіт у серійне виробництво дало можливість підвищити до світового рівня тактико-технічні і технічні характеристики танків, військових машин, автомобільної техніки, технологічного обладнання та устаткування, а також скоротити закупівлю дорогих імпорتنих запасних частин до двигунів та інших агрегатів військової та цивільної техніки.

## **СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ**

1. Континуальна и дискретно-континуальная модификация поверхностей деталей: монография / Н. А. Ткачук, С. С. Дьяченко, Э. К. Посвятенко, С. А. Кравченко, В. Г. Гончаров, В. В. Шпаковский, Н. Л. Белов, А. И. Шейко, А. К. Олейник, И. В. Пономаренко. Харьков : Планета-Принт, 2018. 259 с.
2. Інженерія поверхні / К. А. Ющенко, Ю. С. Борисов, В. Д. Кузнецов, В. М. Корж. Київ : Наук. думка, 2007. 558 с.
3. Канарчук В. Є., Посвятенко Е. К., Лопата Л. А. Інженерія поверхні

деталей транспортних засобів. Київ : Вісник НТУ, 2000. Вип.4. С. 3–14.

4. R. Martynyak, E. Torskaya, Y. Xu. Friction and Multi-Field Problems in Sliding Contacts // *Frontiers in Mechanical Engineering*, 2020. Vol. 6. P. 76.

5. Barber J.R. Contact Mechanics. Springer International Publishing, 2018. 585 p.

6. Zhao J., Vollebregt E., Oosterlee C. Extending the BEM for elastic contact problems beyond the half-space approach // *Math. Modelling and Analysis*, 2016. Vol. 21(1). P. 119–141.

7. Li, Q., Popov, V. L. Non-adhesive Contacts With Different Surface Tension Inside and Outside the Contact Area // *Frontiers in Mechanical Engineering*, 2020. Vol. 6. P. 63.

8. Li Q., Pohrt R., Lyashenko I. A., Popov V. L. Boundary element method for nonadhesive and adhesive contacts of a coated elastic half-space. Proc. Inst.Mech. Eng, 2019. J 234. P. 73–83.

9. Matei A., Sitzmann S., Willner K., Wohlmuth B. I. A mixed variational formulation for a class of contact problems in viscoelasticity, *Applicable Analysis*, 2018. 97:8. P. 1340–1356.

10. Dyfuchyn Y, Rudakov K. Numerical modelling of bolted composite joints. Bolts rigidity effect on normal stresses in the composite layers. *Mech. and Adv. Technologies* 1(79), 2017. P. 19–25.

11. Akula R., Vignollet J., Yastrebov V. A. MorteX method for contact along real and embedded surfaces: coupling X-FEM with the Mortar method B // *Mechanics of Solids*, 2017. Vol. 52. P. 435–443.

12. Wriggers P., Rust W.T., Reddy B. D. A virtual element method for contact // *Computational Mechanics*, 2016. Vol. 58. P. 1039–1050.

13. Popov V.L., Voll L., Kusche S., Li Q., Rozhkova S. V. Generalized master curve procedure for elastomer friction taking into account dependencies on velocity, temperature and normal force // *Tribology International*, April 2018. V. 120. P. 376–380.

14. Ткачук Н. А., Веретельник О. В., Грабовский А. В.,

Кравченко С. А., Белик С. Ю. Повышение прочностных и трибомеханических характеристик элементов машиностроительных конструкций на основе комбинированных методов упрочнения приповерхностных слоев. Двигатели внутреннего сгорания // Всеукр. научно-техн. журнал. Харьков : НТУ «ХП», 2014. №1. С. 54–62.

15. Ткачук Н. А., Веретельник О. В., Грабовский А. В., Кравченко С. А., Белик С. Ю. Численное моделирование контактного взаимодействия деталей ДВС, изготовленных с применением комбинированных технологий. Двигатели внутреннего сгорания // Всеукр. научно-техн. журнал. Харьков : НТУ «ХП», 2014. № 2. С. 63–67.

16. Кравченко С., Посвятенко Е., Ткачук М., Веретельник О. Комбинированные технологии повышения износостойкости высоконагруженных пар трения. Systemy i środki transportu samochodowego. Wybrane zagadnienia. Monografia nr 5. Seria: Transport. Rzeszów: Politechnika Rzeszowska, 2014. P. 269–280.

17. Исследование и доводка тепловозных двигателей/ Н. П. Синенко и др. Москва : Машиностроение, 1975. 184 с.

18. Основы трибологии. Трение, износ, смазка. / Под ред. А. В. Чичинадзе. Москва : Центр «Науки и техники», 1995. 400 с.

19. Гаркунов Д. Н. Триботехника: учебник для студентов вузов. Москва : Машиностроение, 1989. 328 с.

20. Кузнецов А. С. Ремонт двигателей внутреннего сгорания: учебн. пособие. Москва: изд. центр «Академия», 2011. 64 с.

21. Парсаданов И. В., Кравченко С. А., Ткачук Н. А., Шеремет В. Н. Научное обоснование параметров дискретного упрочнения высоконагруженных деталей транспортных энергетических установок. Науковий вісник Херсонської державної морської академії, 2012. №1 (6). С. 298–310.

22. Тартаковский Э. Д., Гончаров В. Г., Сапожников В. М. Анализ эффективности существующих методов ремонта коленчатых валов дизеля 5Д49. 36. Наукових праць. Харків : УДАЗТ, 2009. Вип. №107. С. 71–79.

23. Посвятенко Е. К., Гончаров В. Г. , Д'яченко С. С. , Ткачук М. А. Підвищення ресурсу тепловозів на базі технології дискретного зміцнення деталей форсованих дизелів. Сучасні технології в машинобудуванні. Зб. Наукових праць. Харків: НТУ «ХПІ», 2010. Вип. №5. С. 60–75.
24. Кравченко С. А. , Гончаров В. Г. Повышение надежности деталей двигателя методом дискретного упрочнения. Двигатели внутреннего сгорания, 2009. №1. С. 97–99.
25. Дьяченко С. С., Савченко Б. В., Гончаров И. Г., Понамаренко И. В., Аксенова С. И., Сапожников В. М. Исследование ремонтпригодности тепловозного коленчатого вала. Локомотив-информ, 2007. С. 16–17.
26. Кафедра двигателей внутреннего сгорания. Институт энергетики, электроники и электромеханики. URL: <http://web.kpi.kharkov.ua/diesel/549-2/>.
27. Шпаковский В. В. Повышение ресурса и снижение расхода топлива ДВС путем применения частично-динамической теплоизоляции камеры сгорания. Учебн. пособие по курсу «Особенности эксплуатации и ремонта современных двигателей внутреннего сгорания». Харьков : НТУ «ХПИ», 2013. 132 с.
28. Веретельник О. В., Ткачук Н. А., Белик С. Ю. Контактное взаимодействие поршня с гальваноплазменной обработкой боковой поверхности со стенками цилиндра ДВС. Вісник НТУ «ХПІ». Зб. наук. праць. Тем. вип.: Машинознавство та САПР. Харків : НТУ «ХПІ», 2012. № 22. С. 32–39.
29. Шпаковский В. В., Кравченко С. А., Олейник А. К. Снижение коэффициента трения коленчатый вал-вкладыш двигателей магистральных тепловозов применением дискретного упрочнения и гальваноплазменной обработки. Двигатели внутреннего сгорания, 2013. №1. С. 98–101.
30. Буше Н. А. Подшипниковые сплавы. Москва : Транспорт, 1967. 224 с.
31. Буше Н. А. Трение, износ и усталость в машинах (транспортная техника). Москва : Транспорт, 1987. 223 с.



*Наукове видання*

**НАУКОВО-ТЕХНІЧНІ ПІДХОДИ  
ДО ВИРІШЕННЯ АКТУАЛЬНИХ ПРОБЛЕМ  
РОЗБУДОВИ СЕКТОРУ БЕЗПЕКИ І ОБОРОНИ**

**Колективна монографія**

В авторській редакції

Тех.редактор – Гобельовська Л. П.

Підписано до друку 24.10.2021 р.  
Формат 60x84/16. Папір офсетний. Гарнітура шкільна.  
Друк цифровий. Ум. друк. арк. 19,3. Тираж 100 прим. Зам № 2052.



Видавець та виготовлювач ТОВ «Друкарня Мадрид»  
61024, м. Харків, вул. Максиміліанівська, 11. Тел.: 0800-33-67-62  
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи:  
Серія ДК № 4399 від 27.08.12 р.  
[www.madrid.in.ua](http://www.madrid.in.ua) [info@madrid.in.ua](mailto:info@madrid.in.ua)